

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Прикладна акустика – 1.

ЕЛЕКТРОАКУСТИКА

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка»,
спеціалізацією «Електронні та інформаційні технології кінематографії та
аудіовізуальних систем»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Прикладна акустика – 1. Електроакустика: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації «Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О.П. Гребінь, Н.Ф. Левенець, В.Б. Швайченко – Електронні текстові дані (1 файл: 14,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 145 с.

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для студентів.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 9 від 24.05.2018 р.) за поданням Вченої ради ФЕЛ (протокол № 04/2018 від 23.04.2018 р. та протокол № 05/2018 від 21.05.2018 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Прикладна акустика – 1. ЕЛЕКТРОАКУСТИКА НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Укладачі: *Гребінь Олександр Павлович
Левенець Нінель Федорівна
Швайченко Володимир Борисович, канд. техн. наук, доцент*

Відповідальний
редактор: Лазебний В.С., доцент, к.т.н., доцент

Рецензенти: Луньова С.А., доцент, к.ф-м.н., доцент
Маципура В.Т., професор, д.ф-м.н. професор

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 171 "Електроніка", спеціалізації "Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем"; усіх форм навчання.

Теоретичні відомості, що наведені у посібнику, містять інформацію щодо перетворення акустичних коливань в електричні і навпаки; конструктивних особливостей та технічних характеристик електроакустичних перетворювачів; особливостей роботи перетворювачів на різних звукових частотах; практичного застосування перетворювачів; методів вимірювання основних параметрів електроакустичного обладнання тощо. Основна увага у посібнику приділена мікрофонам та гучномовцям, як основним елементам, що застосовуються у сучасних аудіовізуальних системах і кінематографії.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

ЗМІСТ

Вступ	4
Перелік умовних позначень та скорочень	5
1 Електромеханічні системи і елементи.....	6
1.1 Електромеханічне перетворення	6
1.2 Метод електромеханічних аналогій	15
2 Мікрофони.....	26
2.1 Загальні відомості, класифікація та технічні характеристики мікрофонів.....	26
2.2 Акустичні характеристики мікрофонів.....	35
2.3 Принцип дії та конструкції мікрофонів.....	43
2.4 Спеціалізовані мікрофонні системи і комплекти.....	66
3 Гучномовці та телефони.....	75
3.1 Визначення, класифікація, основні параметри	75
3.2 Дифузорні гучномовці.....	85
3.3 Акустичне оформлення гучномовців.....	98
3.4 Рупорні випромінювачі.....	116
3.5 Електроакустичний, п'єзоелектричний та інші види гучномовців.	122
3.6 Телефони.....	126
4 Методи та особливості вимірювання основних характеристик електроакустичної апаратури	129
Рекомендована література.....	141
Показчик.....	143

ВСТУП

Навчальний посібник з електроакустики призначений для студентів 3-го курсу в рамках вивчення дисципліни «Прикладна акустика - 1. Електроакустика» за спеціальністю 171 "Електроніка", спеціалізації "Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем"; усіх форм навчання.

Навчальний посібник складений у відповідності до навчальної програми курсу «Прикладна акустика» та робочої програми з кредитного модулю «Прикладна акустика – 1. Електроакустика».

Кредитний модуль „Електроакустика” дисципліни „Прикладна акустика” передбачає вивчення конструктивних особливостей, принципів роботи, акустичних та електричних характеристик електроакустичного обладнання, що застосовується в кінематографі, телебаченні, радіомовленні, студіях звукозапису, системах звуковідтворення, телекомунікаційних системах тощо для підготовки та формування звукових і відеопрограм для кіноіндустрії, телерадіомовлення тощо. Дисципліна забезпечує практичне використання набутих знань для розв’язання наукових і виробничих завдань, раціональну кваліфіковану експлуатацію та обслуговування електроакустичного обладнання.

Навчальний посібник містить основні теоретичні відомості стосовно перетворення акустичних коливань в електричні і навпаки; побудови електромеханоакустичних систем та їх елементів; конструкцій та основних технічних характеристик електроакустичних перетворювачів; особливостей роботи перетворювачів на різних звукових частотах; методів вимірювання основних параметрів електроакустичного обладнання тощо. В посібнику наведені технічні параметри та функціональні можливості сучасного електроакустичного обладнання – мікрофонів та гучномовців; особливості застосування електроакустичного обладнання в пристроях та системах звуковідтворення та звукозапису, телекомунікаціях, телебаченні та радіомовленні; сучасні тенденції розвитку електроакустичного обладнання в створенні звукових програм різного призначення.

В посібнику також наведено вимоги та пояснення, які необхідно враховувати при конструюванні, ефективному застосуванні та вимірюванні параметрів електроакустичного обладнання, виконанні розрахунків окремих параметрів тощо.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АК – акустична камера;
АС – акустична система;
АХ – амплітудна характеристика;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
ВЗТ – вимірювач звукового тиску;
ВЧ, НЧ, СЧ – верхні, нижні, середні частоти;
ГЗЧ – генератор звукової частоти;
Гм, ГМ – гучномовець;
ГНЧ – генератор низької частоти;
ГТС – генератор тестових сигналів;
ДВП – деревно-волокниста плита;
ДЗ – джерело звуку;
ДСП – деревно-стружкова плита;
ЕАА – електроакустична апаратура;
ЕАО – електроакустичне обладнання;
ЕАП – електроакустичний перетворювач;
ЕВ - електронний вольтметр;
ЕО - електронний осцилограф;
ЕРС – електрорушійна сила;
ЗК – звукова колонка;
ЗМ – звуковий монітор;
ЗПМ – звукопоглинальний матеріал;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КНС – коефіцієнт нелінійних спотворень;
ЛК, ПК (L, R) – лівий, правий канал;
М – мікрофон;
ТЛФ – головні стереотелефони (стереонавушники);
ФВЧ – фільтр верхніх частот.

1 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ І ЕЛЕМЕНТИ

1.1 Електромеханічне перетворення

Основним змістом цього розділу прикладної акустики як науки є теорія, розрахунок і конструювання пристроїв, за допомогою яких коливання тиску в повітряному середовищі звукового діапазону перетворюються в електричні і навпаки.

Прилади, в яких електричні сигнали перетворюються в механічні або навпаки, називають *електромеханічними перетворювачами*.

Пристрої, що перетворюють механічні коливання в електричні, називають *перетворювачами-генераторами*, а прилади, які перетворюють електричні коливання в механічні, - *перетворювачами-двигунами*.

Застосовувані в техніці звукопередавання мікрофони і гучномовці є **електроакустичними** перетворювачами. Так, енергія електричного сигналу, що підведена до гучномовця, перетворюється в механічну енергію коливань рухомої системи, що утворює акустичний сигнал. В мікрофонах під дією звукового тиску також виникають коливання деякої рухомої системи, в результаті чого виникає електричний сигнал.

Щоб перетворення сигналів не супроводжувалося спотвореннями, коливальні процеси на вході і виході перетворювача повинні відображатися подібними функціями часу, що розрізняються лише постійними множниками пропорційності. Інакше кажучи, **залежність між електричними і механічними величинами на вході і виході перетворювача повинна відповідати лінійними співвідношенням**.

Більшість перетворювачів, які використовують в електроакустичній техніці, є **оберненими**, тобто здатними виконувати електромеханічне перетворення в обох напрямках. Висловлене положення щодо оберненості перетворення енергії зведено до твердження, що втрати потужності прямого і зворотного передавання енергії однакові. Цей принцип може бути названий принципом *взаємності* або *оберненості*.

В разі перетворення електричної енергії в механічну застосовні механічні сили, що виникають або в результаті дії магнітного поля струму, або взаємодії заряджених тіл. Відповідно до цього розрізняють перетворювачі індуктивного типу, робота яких заснована на використанні сил електромагнітного поля, і перетворювачі ємнісного типу, робота яких заснована на використанні сил електростатичного поля.

Перетворювач як чотириполюсник

Аналіз електромеханічних перетворювачів зведемо до аналізу чотириполюсника. Однак це особливий тип чотириполюсника: вхідні величини мають електричну природу, а вихідні - механічну в разі перетворювача-двигуна (рис. 1, а), і навпаки - в разі перетворювача-генератора (рис. 1, б).

На цій підставі можна характеризувати генератор як чотириполюсник з механічним входом і електричним виходом і відповідно двигун - як чотириполюсник з електричним входом і механічним виходом. Електричну сторону перетворювача характеризують силою струму I і напругою U , механічну

сторону - силою F і коливальною швидкістю v . Рівняння лінійного оберненого перетворювача можуть бути записані в класичній формі рівнянь пасивного чотириполіусника, які для перетворювача-двигуна відображає система:

$$\begin{cases} U = Av + BF \\ I = Cv + DF \end{cases} \quad (1.1)$$

де A, B, C, D - коефіцієнти, сенс яких буде визначено надалі.

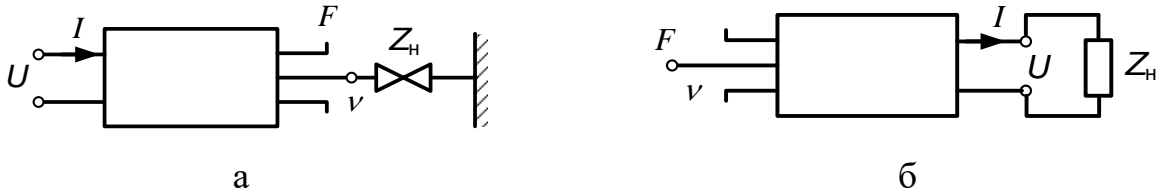


Рисунок 1.1 - Загальна схема електромеханічного перетворювача

Перетворювач-генератор можна вважати оберненим електромеханічним чотириполіусником. В разі передавання енергії в зворотну сторону, тобто для оберненого чотириполіусника, вирішивши останню систему щодо v і F , отримаємо

$$\begin{cases} v = (BI - DU) / (CB - DA) \\ F = (CU - AI) / (CB - DA) \end{cases} \quad (1.2)$$

За теорією електричних кіл для оберненого чотириполіусника необхідно дотримуватися правила знаків. Так, для перетворювача індуктивного типу слід прийняти $CB - DA = 1$, а для перетворювача ємнісного типу $CB - DA = -1$. Після цього попередні рівняння для перетворювачів обох типів будуть мати вигляд

$$\begin{cases} (\pm)v = DU + BI \\ (\pm)F = CU + AI \end{cases} \quad (1.3)$$

де «+» - індуктивний тип перетворювача; «-» - ємнісний тип перетворювача; $CB - DA = \pm 1$.

Визначимо **фізичний зміст** коефіцієнтів.

Припустимо, що перетворювач працює в режимі холостого ходу як двигун (наприклад, загальмований гучномовець, при цьому $v = 0$) і як генератор (наприклад, ненавантажений мікрофон, при цьому $I = 0$). Тоді на підставі (1.1) і (1.3) отримаємо для цього режиму

$$\begin{cases} U = BF_0 \\ I = DF_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\begin{cases} v = DU_0 \\ F = CU_0 \end{cases} \quad (1.5)$$

Звідси можна отримати формулу

$$F_0/I = U_0/v = 1/D = K.$$

Ця важлива формула виражає *теорему взаємності* в застосуванні до електромеханічного перетворювача. Величина K носить назву *коефіцієнта електромеханічного зв'язку*.

Пояснимо фізичний зміст і практичне значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку.

Нехай є перетворювач у вигляді витка проводу довжиною l , розташованого перпендикулярно силовим лініям магнітного поля, індукція якого дорівнює B_0 (рис. 1.2, а).

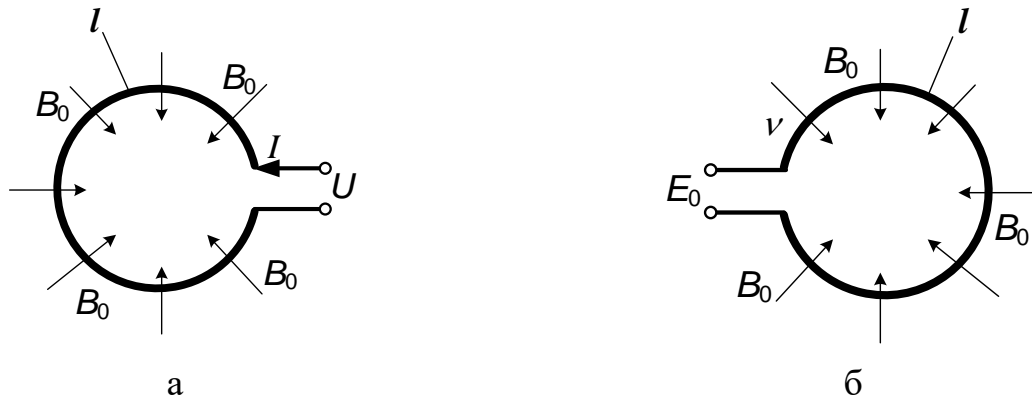


Рисунок 1.2 - Перетворювач електродинамічного типу

В разі проходження струму у провіднику на останній діє сила, що за законом Ампера дорівнює

$$F_0 = B_0 I l.$$

Ця сила призводить провідник в рух. На цьому принципі основана робота електродинамічного гучномовця.

Якщо провідник, що знаходиться в магнітному полі, буде приведений у рух зі швидкістю v , то в ньому буде індукувати електрорушійна сила, що за законом електромагнітної індукції дорівнює (рис. 1.2, б)

$$E_0 = B_0 l v,$$

тобто перетворювач буде працювати як генератор. На цьому принципі заснована робота електродинамічних мікрофонів.

З виразів для F_0 і E_0 можна визначити коефіцієнт електромеханічного зв'язку перетворювача *електродинамічної системи*:

$$K = \frac{F_0}{I} = \frac{E_0}{v} = B_0 l.$$

Використовуючи закони електростатичного поля, можна пояснити роботу електростатичних перетворювачів.

Якщо взяти конденсатор з постійною напругою на його обкладинках U_0 і одну з його обкладинок коливати зі змінною швидкістю v (рис. 1.3, б), то конденсатор буде створювати змінну ЕРС

$$E = \frac{U_0 v}{j\omega d},$$

де d - відстань між обкладинками конденсатора в відсутності коливань; ω - частота коливань. Дійсно, зміна відстані між обкладинками конденсатора змінює його ємність, що в свою чергу викликає змінення заряду конденсатора, тобто виникає змінний струм. На цьому принципі заснована робота конденсаторного мікрофона.

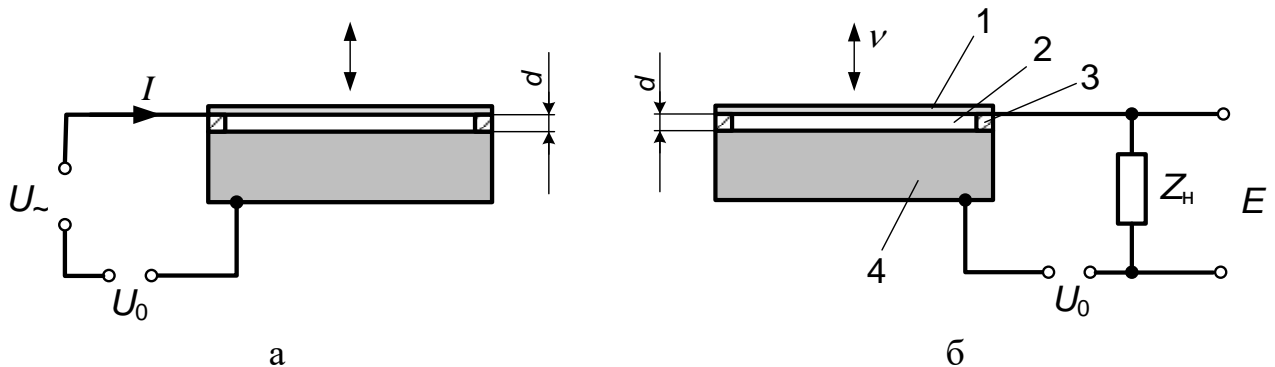


Рисунок 1.3 - Перетворювач електростатичного типу

У той же час, якщо через цей конденсатор буде протікати змінний струм I , викликаний прикладеною до нього змінною напругою $U_{\sim} \ll U_0$ (рис. 1.3, а), то між обкладинками конденсатора буде діяти змінна сила

$$F_0 = \frac{IU_0}{j\omega d}.$$

На цьому принципі заснована робота конденсаторного (електростатичного) гучномовця.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку перетворювача ємнісної (електростатичної) системи:

$$K = \frac{F_0}{I} = \frac{E_0}{v} = \frac{U_0}{j\omega d}.$$

Уявна величина коефіцієнта електромеханічного зв'язку показує, що сила і струм зсунуті за фазою на 90° . Слід звернути увагу на залежність коефіцієнта електромеханічного зв'язку від частоти переданих коливань.

Якщо пластину п'єзокристалу деформувати, наприклад змусити один з її кінців коливатися зі швидкістю v (рис. 1.4, б), то на її електродах утворюється змінна ЕРС

$$E_0 = \frac{kl^2v}{j\omega h^2}$$

де l , h - довжина і товщина пластини відповідно; k - коефіцієнт п'єзоефекту.

Це явище називають *прямим п'єзоефектом* і використовують в перетворювачах-генераторах (мікрофонах).

Якщо ту ж пластину помістити в змінне електричне поле, інакше кажучи, на електроди такої пластинки подати змінну напругу U_{\sim} , що викликає струм I (рис. 1.4, а), то пластина буде відчувати змінну силу

$$F_0 = \frac{kl^2I}{j\omega h^2}.$$

Це явище називають *зворотним п'єзоефектом* і використовують в перетворювачах-двигунах (гучномовцях).



Рисунок 1.4 - Перетворювач п'єзоелектричного типу

Коефіцієнт електро механічного зв'язку для п'єзоелектричних перетворювачів з згинальною деформацією визначається як

$$K = \frac{F_0}{I} = \frac{E_0}{\nu} = \frac{k_0 l^2}{j\omega h^2}.$$

Якщо мембрану з феромагнітного матеріалу наближати до полюсних наконечників постійного магніту або віддаляти від них (рис. 1.5, б), тобто змінювати величину магнітного потоку, що протікає через осердя котушок, то в котушках буде індуковано ЕРС

$$E_0 = \frac{B_0 L_k \nu}{n},$$

де n - кількість витків котушки; B_0 - індукція в магнітному колі (за відсутності коливань); L_k - індуктивність котушки.

На цьому принципі заснована робота електромагнітних мікрофонів і звукознімачів механічної системи запису звуку.

Якщо до котушок докласти змінну напругу U_{\sim} , що створює в них струм I (рис. 1.5, а), то за умови $B_{\sim} \ll B_0$ на мембрану буде діяти змінна сила

$$F_0 = \frac{B_0 L_k I}{n}.$$

На розглянутому принципі заснована робота електромагнітних гучномовців і телефонів.



Рисунок 1.5 - Перетворювач електромагнітного типу

Електромеханічний перетворювач електромагнітної системи має коефіцієнт електромеханічного зв'язку

$$K = \frac{B_0 L_k}{n}.$$

Визначимо інші коефіцієнти початкових лінійних рівнянь.

У режимі холостого ходу механічної частини двигуна ($v = 0$) співвідношення між струмом і напругою в електричній частині визначено лише електричним опором перетворювача. Розділивши рівняння (1.4) одне на одне, отримаємо

$$\frac{U}{I} = \frac{B}{D} = Z_0 = BK,$$

де Z_0 - власний **електричний опір** перетворювача.

Звідси

$$B = DZ_0 = \frac{Z_0}{K}.$$

Аналогічно стосовно перетворювача-генератора, отримуємо з (1.5)

$$\frac{F}{v} = \frac{C}{D} = z_0,$$

де Z_0 - власний **механічний опір** рухомої частини перетворювача. Звідси

$$C = D z_0 = Z_0/K.$$

Нарешті, коефіцієнт A отримаємо зі співвідношення між коефіцієнтами пасивного чотириполусника:

$$\begin{aligned} CB - DA &= -1, \\ DA &= 1 + CB, \\ A &= \frac{(1 + BC)}{D} = \frac{1}{D} + \frac{BC}{D} = K + K(BC) = \\ &= K[1 + (BC)] = K \left[1 + \left(\frac{Z_0}{K} \cdot \frac{z_0}{K} \right) \right] = K \left(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2} \right). \end{aligned}$$

Отже, рівняння **перетворювача-двигуна** можуть тепер бути записані в такій формі:

$$\begin{cases} U = K \left(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2} \right) v + \frac{Z_0}{K} F \\ I = \frac{z_0}{K} v + \frac{1}{K} F \end{cases}.$$

Аналогічну форму можна надати і рівнянням для **перетворювача-генератора**

$$\begin{cases} v = \frac{1}{K} U + \frac{Z_0}{K} I \\ F = \frac{z_0}{K} U + K \left(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2} \right) I \end{cases}.$$

Отримавши усі виведені співвідношення, можна вирішити будь-яке завдання щодо поведінки перетворювача в разі його роботи в довільному режимі.

Розглянемо, наприклад, вхідний опір перетворювача-двигуна. Розділивши рівняння (1.4) одне на одне, отримуємо

$$\frac{U}{I} = Z = \frac{(Av + BF)}{(Cv + DF)} = \frac{(A + Bz)}{(C + Dz)},$$

де Z , z – відповідно, повний електричний і повний механічний опір перетворювача-двигуна. Підставивши в це загальне вираження значення коефіцієнтів, знаходимо

$$Z = \frac{K(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2}) + \frac{z Z_0}{K}}{\frac{z_0}{K} + \frac{z}{K}} = Z_0 + \frac{K^2}{z_0 + z} = Z_0 + Z_{\text{вн}}, \quad (1.6)$$

де $Z_{\text{вн}}$ - внесений електричний опір.

Це теж дуже важлива формула. Сенса її полягає в тому, що власний електричний опір перетворювача в результаті реакції механічної частини зростає на величину $Z_{\text{вн}} = K^2/(z + z_0)$, звану *внесеним електричним опором*.

Фізичний сенс внесеного опору індуктивного перетворювача пояснимо на прикладі. Якщо до провідника, який розташовано в магнітному полі, прикласти напругу, то струм, що у ньому з'явився, зумовить виникнення сили Ампера і, відповідно, спричинить рух провідника. Однак через оберненість перетворювача рух провідника буде пов'язаний з виникненням у цьому провіднику ЕРС. Остання, як відомо із законів індукції, "перешкоджає причині, що її викликала" і зазвичай її називають протиЕРС, так як спрямована назустріч прикладеної напруги. Відповідно до цього відбудеться зменшення напруги і струму, що еквівалентно внесенню додаткового опору в електричне коло.

Розглянемо перетворювач-генератор. Вхідний механічний опір генератора отримаємо, розділивши одне на одне рівняння (1.3):

$$\frac{F}{v} = z = \frac{(AI + CU)}{(BI + DU)} = \frac{(A + CZ)}{(B + DZ)} = \frac{K(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2}) + \frac{z_0 Z}{K}}{\frac{Z_0}{K} + \frac{Z}{K}} = z_0 + \frac{K^2}{Z_0 + Z} = z_0 + z_{\text{вн}}, \quad (1.7)$$

де $z_{\text{вн}}$ - внесений механічний опір.

Отриманий вираз аналогічний (1.6) з тією лише різницею, що співвідношення сили до швидкості визначено механічним опором, а не електричним, як для закону Ома.

Таблиця 1.1 – Основні співвідношення для перетворювачів

Перетворювач ДВИГУН (Гучномовець)	Перетворювач ГЕНЕРАТОР (Мікрофон)
Лінійні рівняння перетворювачів	
$\begin{cases} U = Av + BF \\ I = Cv + DF \end{cases}$	$\begin{cases} v = (BI - DU) / (CB - DA) \\ F = (CU - AI) / (CB - DA) \\ \begin{cases} (\pm)v = DU + BI \\ (\pm)F = CU + AI \end{cases} \end{cases}$
Лінійні рівняння перетворювачів у режимі холостого ходу	
$\begin{cases} v = 0 \\ U = BF_0 \\ I = DF_0 \end{cases}$	$\begin{cases} I = 0 \\ v = DU_0 \\ F = CU_0 \end{cases}$
$\begin{cases} B = \frac{U}{F_0} \\ D = \frac{I}{F_0} \end{cases}$	$\begin{cases} D = \frac{v}{U_0} \\ C = \frac{F}{U_0} \end{cases}$
Узагальнений коефіцієнт електромеханічного зв'язку перетворювачів	
$F_0/I = 1/D = K$	$U_0/v = 1/D = K$
Вихідні рівняння та коефіцієнт електромеханічного зв'язку електродинамічних перетворювачів	
$F_0 = B_0 l I$	$E_0 = B_0 l v$
$K = \frac{F_0}{I} = B_0 l$	$K = \frac{E_0}{v} = B_0 l$
Вихідні рівняння та коефіцієнт електромеханічного зв'язку електростатичних перетворювачів	
$F_0 = \frac{IU_0}{j\omega d}$	$E_0 = \frac{U_0 v}{j\omega d}$
$K = \frac{F_0}{I} = \frac{U_0}{j\omega d}$	$K = \frac{E_0}{v} = \frac{U_0}{j\omega d}$
Вихідні рівняння та коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзоелектричних перетворювачів	
$F_0 = \frac{kl^2 I}{j\omega h^2}$	$E_0 = \frac{kl^2 v}{j\omega h^2}$
$K = \frac{F_0}{I} = \frac{k_0 l^2}{j\omega h^2}$	$K = \frac{E_0}{v} = \frac{k_0 l^2}{j\omega h^2}$

Вихідні рівняння та коефіцієнт електромеханічного зв'язку електромагнітних перетворювачів	
$F_0 = \frac{B_0 L_k I}{n}$	$E_0 = \frac{B_0 L_k v}{n}$
$K = \frac{B_0 L_k}{n}$	$K = \frac{B_0 L_k}{n}$
Повний опір перетворювачів з урахуванням вхідних/вихідних параметрів та принципу оберненості	
$\frac{U}{I} = \frac{B}{D} = Z_0 = BK;$ $B = DZ_0 = \frac{Z_0}{K}$	$\frac{F}{v} = \frac{C}{D} = z_0 = CK;$ $C = D z_0 = \frac{z_0}{K} = z_0/K.$
$\begin{cases} U = K \left(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2} \right) v + \frac{Z_0}{K} F \\ I = \frac{z_0}{K} v + \frac{1}{K} F \end{cases}$	$\begin{cases} v = \frac{1}{K} U + \frac{Z_0}{K} I \\ F = \frac{z_0}{K} U + K \left(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2} \right) I \end{cases}$
$\frac{U}{I} = Z = \frac{(Av + BF)}{(Cv + DF)} = \frac{(A + Bz)}{(C + Dz)}$	$\frac{F}{v} = z = \frac{(AI + CU)}{(BI + DU)} = \frac{(A + CZ)}{(B + DZ)}$
$Z = \frac{K(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2}) + \frac{z_0 Z}{K}}{\frac{z_0}{K} + \frac{Z}{K}} =$ $= Z_0 + \frac{K^2}{z_0 + Z} = Z_0 + Z_{BH},$	$z = \frac{K(1 + \frac{z_0 Z_0}{K^2}) + \frac{z_0 Z}{K}}{\frac{Z_0}{K} + \frac{Z}{K}} =$ $= z_0 + \frac{K^2}{Z_0 + Z} = z_0 + z_{BH},$

Еквівалентні схеми перетворювачів

На рис. 1.6 наведено узагальнені еквівалентні схеми перетворювачів.

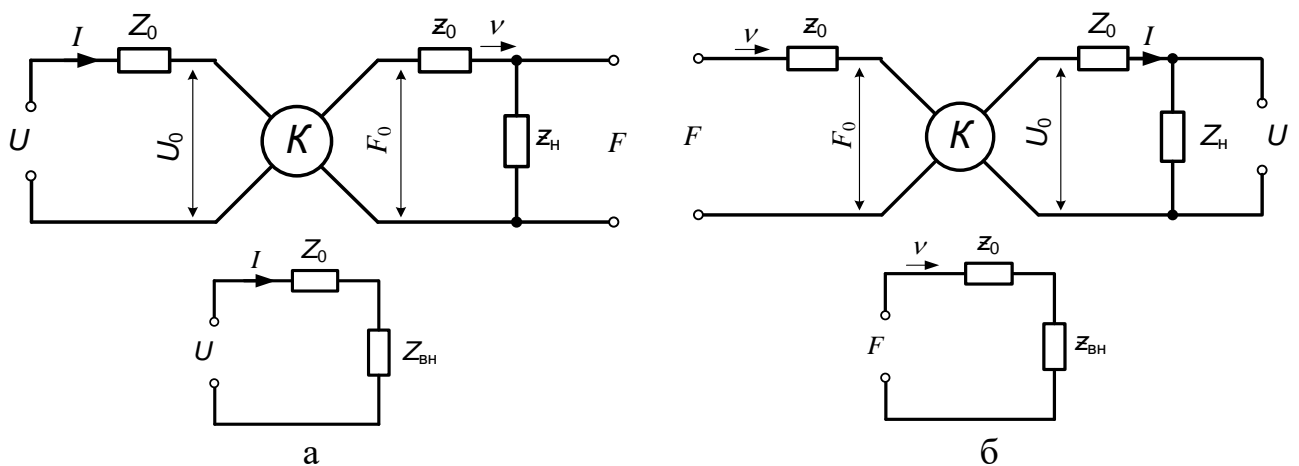


Рисунок 1.6 - Еквівалентні схеми перетворювачів

На рис. 1.6, а наведено узагальнену еквівалентну схему перетворювача-двигуна. Елемент K означає власне перетворювач, частина схеми ліворуч від K відображає електричну схему, частина схеми праворуч від K є еквівалентною схемою механічної частини. На цьому ж рисунку зображено еквівалентну електричну схему, що складено з двох опорів - електричного опору Z_0 і внесеного електричного опору $Z_{\text{вн}}$.

На рис. 1.6, б наведено узагальнену еквівалентну схему перетворювача-генератора і еквівалентну механічну схему.

1.2 МЕТОД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АНАЛОГІЙ

У електроакустичних пристроях застосовують складні *механічні* або *механоакустичні коливальні системи*. Їх аналіз звичайними методами механіки - складанням і рішенням рівнянь сил для кожного елемента - пов'язаний з великими труднощами. Процедура розрахунку складних коливальних систем можливо суттєво скоротити в разі застосування методу електромеханічних аналогій.

В основі цього методу лежить подібність між рівняннями, що описують коливальні явища різної фізичної природи - електричні і механічні. Якщо рівняння аналогічні, то однакові і методи їх вирішення. Тому вирішення тієї чи іншої механічної задачі може бути замінено рішенням подібного електромеханічного завдання. Така заміна виявилася дуже зручною, так як, з одного боку, теорія складних електричних кіл була розроблена ще в кінці позаминулого століття, тобто значно раніше, ніж з'явилася необхідність вирішення подібних механічних завдань, а, з іншого боку, електроакустиком з самого початку займалися інженери-електрики, для яких природне прагнення вирішувати механічні завдання зрозумілими їм методами теорії електричних кіл.

Таким чином, *сутність методу електромеханічних аналогій* полягає в тому, що будь-яку механічну коливальну систему можна замінити аналогічною їй електричною. Для аналізу останньої застосовують добре розроблений математичний апарат, що застосовується в теорії електричних кіл. Результати аналізу переносять на механічну коливальну систему з урахуванням аналогій їх елементів.

Найбільше застосування отримала система електромеханічних аналогій, що базована на подібності рівнянь Кірхгофа для послідовного електричного контуру рівнянням за принципом Даламбера для механічного вузла.

Відзначимо математичну аналогію між струмом $I = dq/dt$ і коливальною швидкістю $v = dx/dt$.

Оскільки в електротехніці відношення напруги до струму називають електричним опором, то для кола, послідовно з'єднаних відносно джерела напруги активного опору R , котушки індуктивності L і ємності C загальний опір буде визначено як

$$Z = \frac{U}{I} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}).$$

Аналогічно для механічної коливальної системи

$$z = \frac{F}{v} = r + j(\omega m - \frac{1}{\omega c}).$$

Останнє рівняння можна назвати **механічним законом Ома**. Природно, що одиниця вимірювання механічного опору отримало назву *мехом*. Розмірність механічного опору - кг·м/с.

Аналогічно можна визначити резонансні частоти:

для електричного кола $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}},$

а для механічного $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{mc}}.$

Отже, між швидкістю коливань, величиною зовнішньої сили, параметрами механічної системи і частотою має місце таке ж співвідношення, як між струмом, ЕРС, параметрами електричного кола і частотою в еквівалентному електричному колі.

Іншими словами, індуктивність, активний опір і ємність є аналогами відповідно маси, опору тертя і гнучкості.

Слід зауважити, що зазначені аналоги носять не суто формальний характер, але і мають фізичний зміст. Так, індуктивність в електричному колі перешкоджає миттєвому зростанню або зменшенню струму в разі підключення або відключення джерела напруги.

Таку ж роль виконує маса в механічних системах. Інерційність тіла перешкоджає миттєвому наростанню швидкості в разі прикладення сили і перешкоджає тілу відразу зупинятися.

Через активний опір в електричному колі частина енергії струму перетворюється на тепло. Також перетворюється на тепло частина механічної енергії за наявності тертя.

Енергія зарядженого конденсатора аналогічна енергії стиснутої пружини.

Струм в електричній схемі відповідає швидкості в механічній системі, а ЕРС в електричній системі - силі в механічній системі.



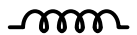


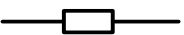




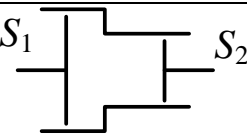
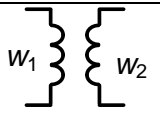
Узагальнюючи все викладене, складемо таблицю електромеханічних аналогій (табл. 1.2).

Звідси відразу отримуємо визначення відповідності між способами з'єднання для елементів механічної та аналогічної їй електричної системах: з'єднанню механічних елементів **ланцюжком** (послідовно) відповідає паралельне з'єднання електричних двополюсників; з'єднанню в вузли (паралельно) відповідає послідовне з'єднання.

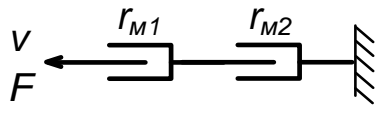
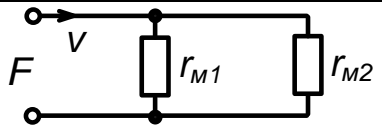
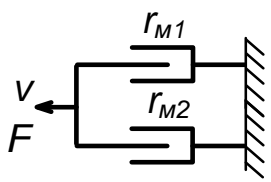
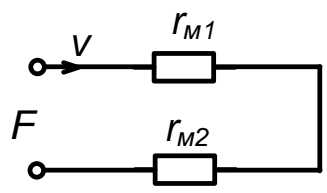
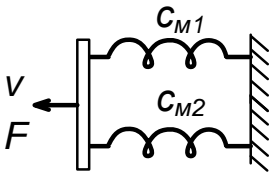
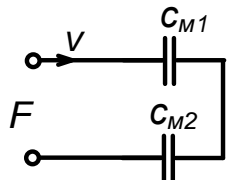
На підставі цих міркувань можна скласти перші еквівалентні схеми, тобто електричні схеми, що відображають електричну систему, аналогічну (еквівалентну) даній механічній (табл. 1.2).

Для наведених найпростіших механічних систем складання еквівалентних схем не викликає особливих труднощів і може бути виконано без застосування будь-яких систематичних правил. Однак для більш складних механічних систем бажано застосування певних загальних прийомів, які давали б відому гарантію безпомилковості складання еквівалентного електричного кола.

Таблиця 1.2 – Позначення механічних елементів та їх електричних аналогів

Механічні величини		Електричні аналоги	
Найменування	Позначення	Найменування	Позначення
Маса	m 	Індуктивність	L 
Гнучкість	c 	Ємність	C 
Тертя	r 	Активний опір	R 
Точка прикладання сили	F 	Джерело напруги, напруга	E, U 
Коливальна швидкість	v	Струм	I
Комплексний механічний опір	z 	Комплексний електричний опір	Z 
Трансформатор акустичний	S_1  S_2 $n = S_2 / S_1$	Трансформатор електричний	 w_1 w_2 $n = w_2 / w_1$
$z = \frac{F}{v} = r + j(\omega m - \frac{1}{\omega c}).$		$Z = \frac{U}{I} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}).$	
$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{mc}}.$		$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}},$	

Таблиця 1.3 – Позначення з'єднання механічних елементів та їх електричних аналогів у схемах

Позначення механічних елементів	Позначення електричних елементів аналогів
	
	
	

Розглянемо тут і надалі будемо використовувати один з методів складання еквівалентних схем, запропонований Г.А. Гамбурцевим.

Перш ніж розглядати ці правила, зазначимо, що найбільш складною є побудова механічної схеми пристрою. Вона повинна починатися з виявлення елементів механізму, що беруть участь у русі. Потім визначають масу, на яку безпосередньо діє зовнішня сила.

На механічній схемі сила має бути прикладено до маси відносно нерухомої точки механізму. Інші елементи, пов'язані з цією масою, підключають або послідовно, або паралельно відносно напрямку її руху.

При визначенні способу підключення слід користуватися простим правилом:

- якщо рух передається через цей елемент і його вилучення спричинить за собою припинення передачі руху, то даний елемент слід підключати послідовно;
- якщо вилучення елемента не тягне за собою припинення передачі руху, то цей елемент підключають паралельно відносно напрямку дії сили.

Подальшу передача руху зображують на схемі іншими елементами, що беруть участь в русі. При цьому дуже важливо визначити, через які елементи рух від маси, до якої прикладена зовнішня сила, передано іншим масам механізму.

Правила побудови схем електричних аналогів механічних систем розглянемо на прикладі спрощеної моделі рухомої частини електродинамічної головки гучномовця (рис.1.7, а).

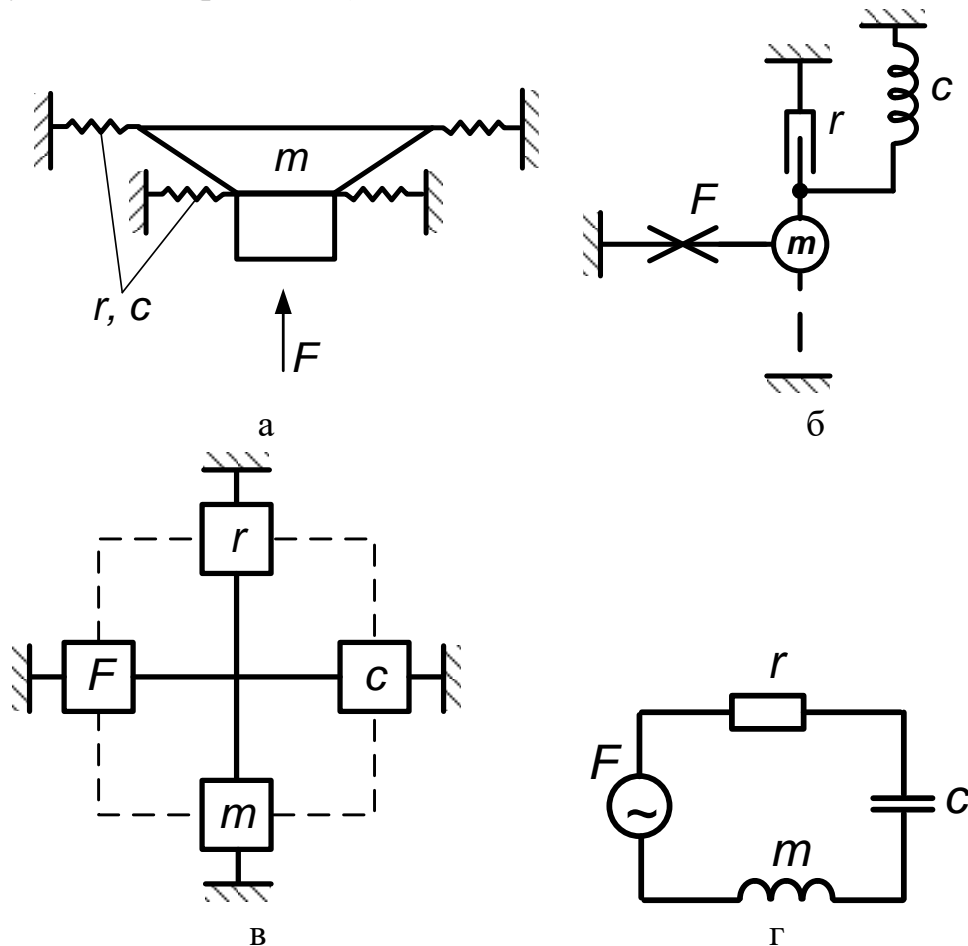


Рисунок 1.7 - Етапи побудови електричного аналога механічної системи

На схемі F - сила, що діє на котушку в разі проходження струму; c - загальна гнучкість підвісу дифузора; r - втрати на молекулярне тертя підвісу; m - маса дифузора і котушки.

Отже, для побудови електричного аналога:

1. Накреслюють схему механічної коливальної системи. Побудову починають з точки прикладання сили (рис. 1.7, б). Лінії, що з'єднують елементи механічної схеми, називають лініями механічного зв'язку. При цьому обов'язково враховують, що маса зміщується відносно нерухомої точки. На схемі це позначають штриховою лінією, що з'єднує масу з нерухомою точкою механізму.

2. Механічну схему трансформують. При цьому всі елементи схеми замінюють блоками з літерними позначеннями їх елементів. Елементи маси зсувають вздовж штрихової лінії в сторону нерухомої точки, штрихову лінію замінюють суцільною (рис. 1.7, в).

Всі блоки з'єднують штриховими лініями, які при перетині кожного блоку проводять перпендикулярно лініям механічного зв'язку і утворюють замкнені

контури. Ці переривчасті лінії має бути з'єднано без перетину ліній механічного зв'язку так, щоб усередині замкнених контурів не виявилось нерухомих частин механізму.

3. Перебудовують схему, що утворено переривчастими лініями, причому блоки замінюють зображеннями відповідних електричних аналогів (рис. 1.7, г). У отриманій схемі залишають позначення механічних величин.

Акустичні системи

Крім механічних коливальних систем в електроакустичних перетворювачах використовують так звані акустичні коливальні системи, в яких окремі елементи являють собою газоподібне середовище. У акустичних системах використовують порожнини, канали, об'ємні резонатори, які в поєднанні можуть створювати складні пристрої, за своєю дією аналогічні різного роду резонансним контурам, фільтрам тощо. Прикладом найпростішої акустичної коливальної системи є резонатор Гельмгольца (рис. 1.8).

Власне кажучи, резонатор є системою з розподіленими параметрами. Однак якщо розміри резонатора малі у порівнянні з довжиною хвилі коливань, що діють на резонатор, то практично таку систему можна розглядати, як систему з зосередженими параметрами.

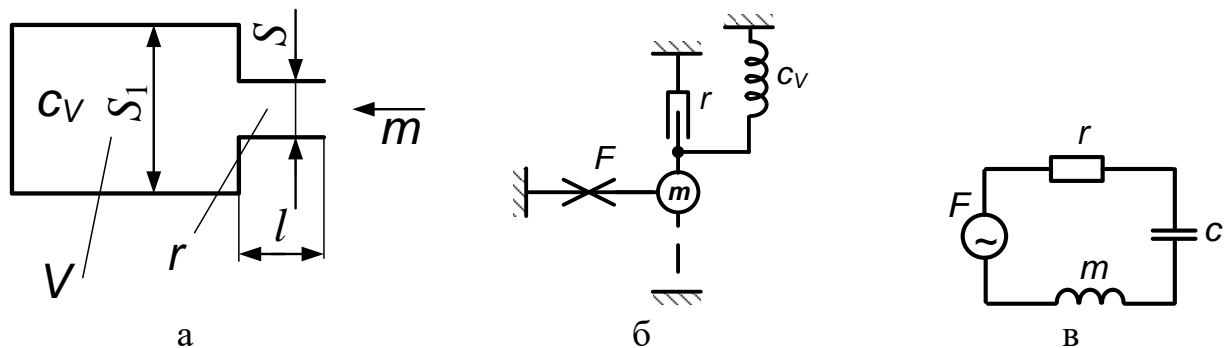


Рисунок 1.8 - Резонатор Гельмгольца (а) і його еквівалентна схема (б,в)

Резонатор Гельмгольца є посудиною з об'ємом порожнини V і горлом завдовжки l з площею поперечного перерізу S (рис.1.8, а). Все повітря, що знаходиться в резонаторі, розділяють умовно на дві частини: одна знаходиться в порожнині, інша - в горлі резонатора.

Всю масу повітря резонатора m вважаємо зосередженою в горлі резонатора, де повітря (практично не стискаючись) буде здійснювати коливання на зразок жорсткого поршня. При коливаннях такого поршня між частинками повітря і стінками трубки виникає тертя r . Повітря, що знаходиться в порожнині резонатора, характеризує, в основному, пружність, тобто воно виконує функцію елемента гнучкості c_v . Зрозуміло, такий поділ справедливий лише приблизно, так як деяка частина повітря в порожнині має інерційний опір. Однак при досить великому відношенні S_1/S (S_1 - площа перерізу порожнини горла) точність такого наближення цілком задовільна, так як основна частина кінетичної енергії коливань виявляється зосередженою в тій частині повітряного потоку резонатора, де коливальна швидкість частинок повітря має найбільшу величину, тобто в горлі резонатора.

Таким чином, отримано схему механічного вузла. Тому всі отримані раніше результати справедливі і для розглянутої акустичної коливальної системи. Наприклад, резонансну частоту резонатора може бути обчислено за формулою

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{mc_V}}.$$

Резонатори знаходять велике практичне застосування, причому останнє залежить від величини і характеру активного опору. Якщо активним опором можна знехтувати, то резонатор поводить себе як підсилювач звуків, частота яких близька або дорівнює його резонансній частоті. Якщо опір тертя r штучно збільшено, то резонатор набуває властивостей поглинача звукової енергії. На цьому заснована дія резонансних звукопоглиначів, в яких тертя збільшено за допомогою тканини, що закриває горло резонатора.

У конструкціях електроакустичних апаратів часто використовують пристрої, що забезпечують зміну площі перерізу потоку повітря, що коливається. У найпростішому вигляді такий пристрій можна уявити у вигляді двох ідеальних (невагомих) поршнів різної площі, пов'язаних між собою через об'єм повітря в камері.

Нехай поршень площею S_1 (рис. 1.9, а) під дією сили здійснює коливання зі швидкістю v_1 . Потік повітря, що витісняється їм, має об'ємну швидкість $v_1 S_1$. Нехтуючи поки стисненням повітря в камері, можна вважати, що весь витіснений потік пройде через перетин S_2 , так що $v_1 S_1 = v_2 S_2$ або

$$v_2/v_1 = S_1/S_2 = n.$$

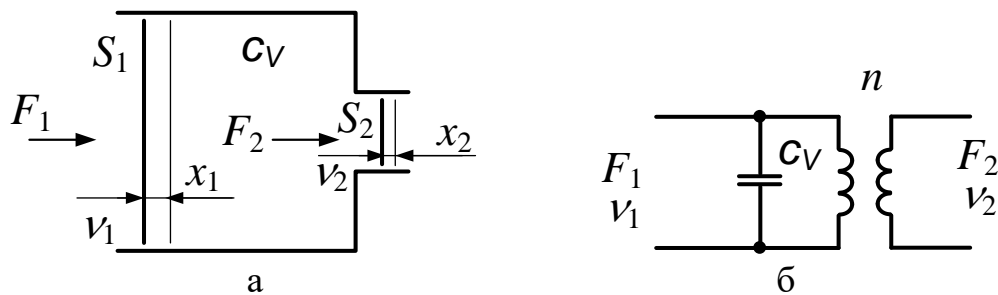


Рисунок 1.9 - Акустичний трансформатор (а) і його еквівалентна схема (б)

При зміщенні першого поршня на величину x_1 в камері виникає надлишковий тиск $p_{зв}$, який врівноважує зовнішню силу так, що $F_1 = p_{зв} S_1$. Цей тиск діє рівномірно на всі стінки камери, в тому числі і на поршень S_2 . Тому $F_2 = p_{зв} S_2$. Але так як $p_{зв} = F_1/S_1$, то $F_2 = F_1 S_2/S_1$ або $F_2/F_1 = S_2/S_1 = n$.

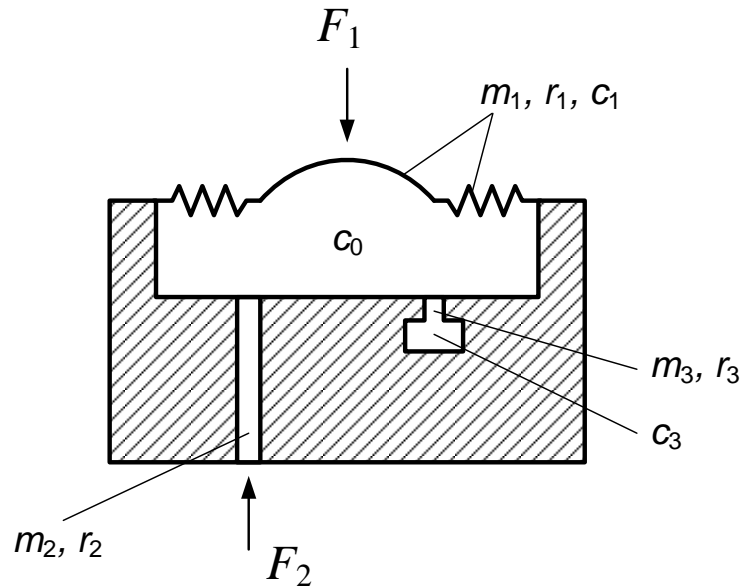
Отримані співвідношення аналогічні відповідним співвідношенням в електричному трансформаторі. Аналогом кількості витків в електричному трансформаторі є площі перетинів отворів в камері. функцію поршня зазвичай виконую шар повітря у відповідному отворі. Таким чином, камера є акустичним трансформатором сил і швидкостей. Реально повітря в камері, звичайно, стискається і, отже, рух від поршня S_1 передається частинкам повітря в отворі S_2 через елемент гнучкості об'єму повітря в камері.

На схемі електричного аналога акустичного трансформатора елемент гнучкості може бути підключено або паралельно первинній обмотці трансформатора, або паралельно вторинній. У електричному трансформаторі

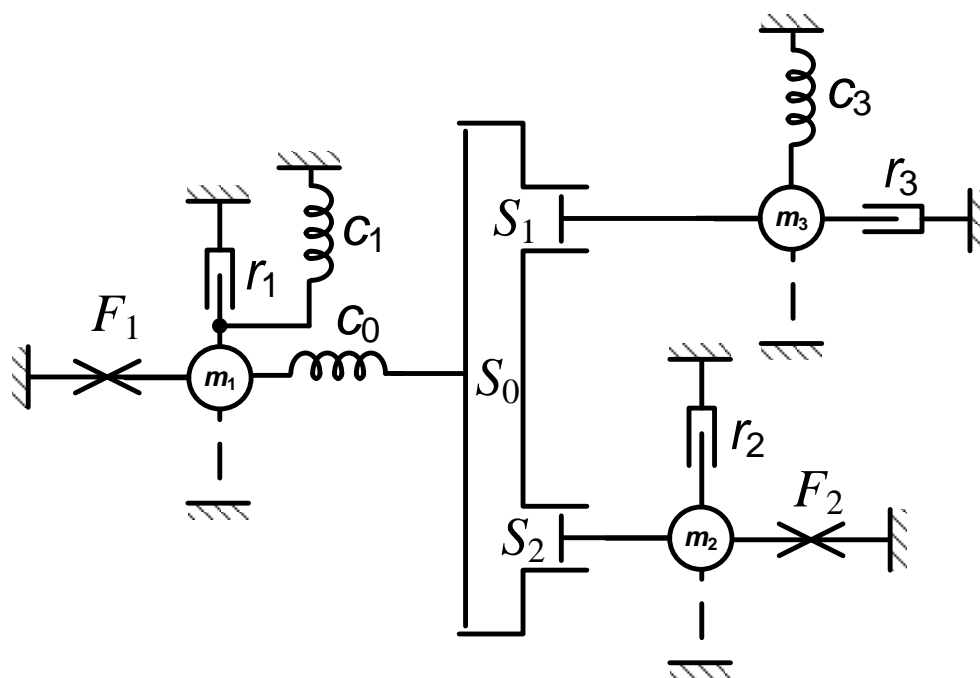
може бути кілька вторинних обмоток. Також в акустичному трансформаторі може бути кілька вихідних отворів.

Приклади побудови схеми електричного аналога механічної системи

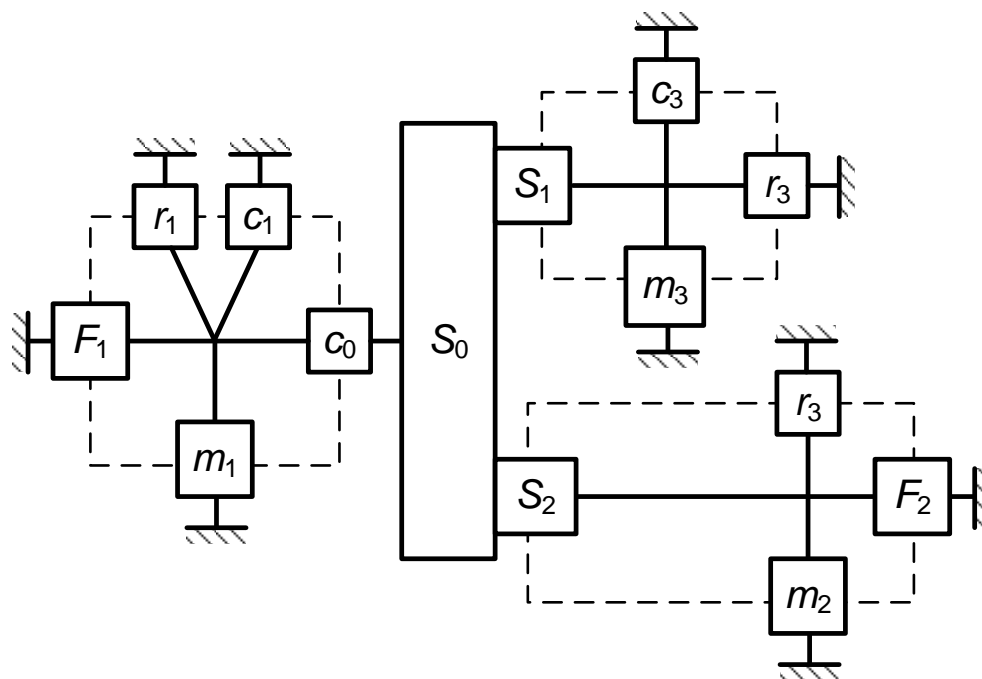
На рисунках 1.9 та 1.10 наведено приклади побудови, відповідно схеми електричного аналога складної механічної системи з одним резонатором та схеми електричного аналога складної механічної системи з декількома резонаторами.



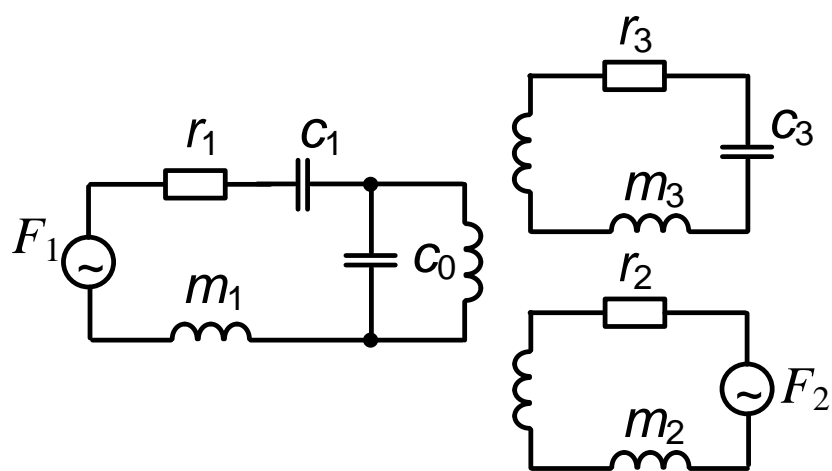
а



б

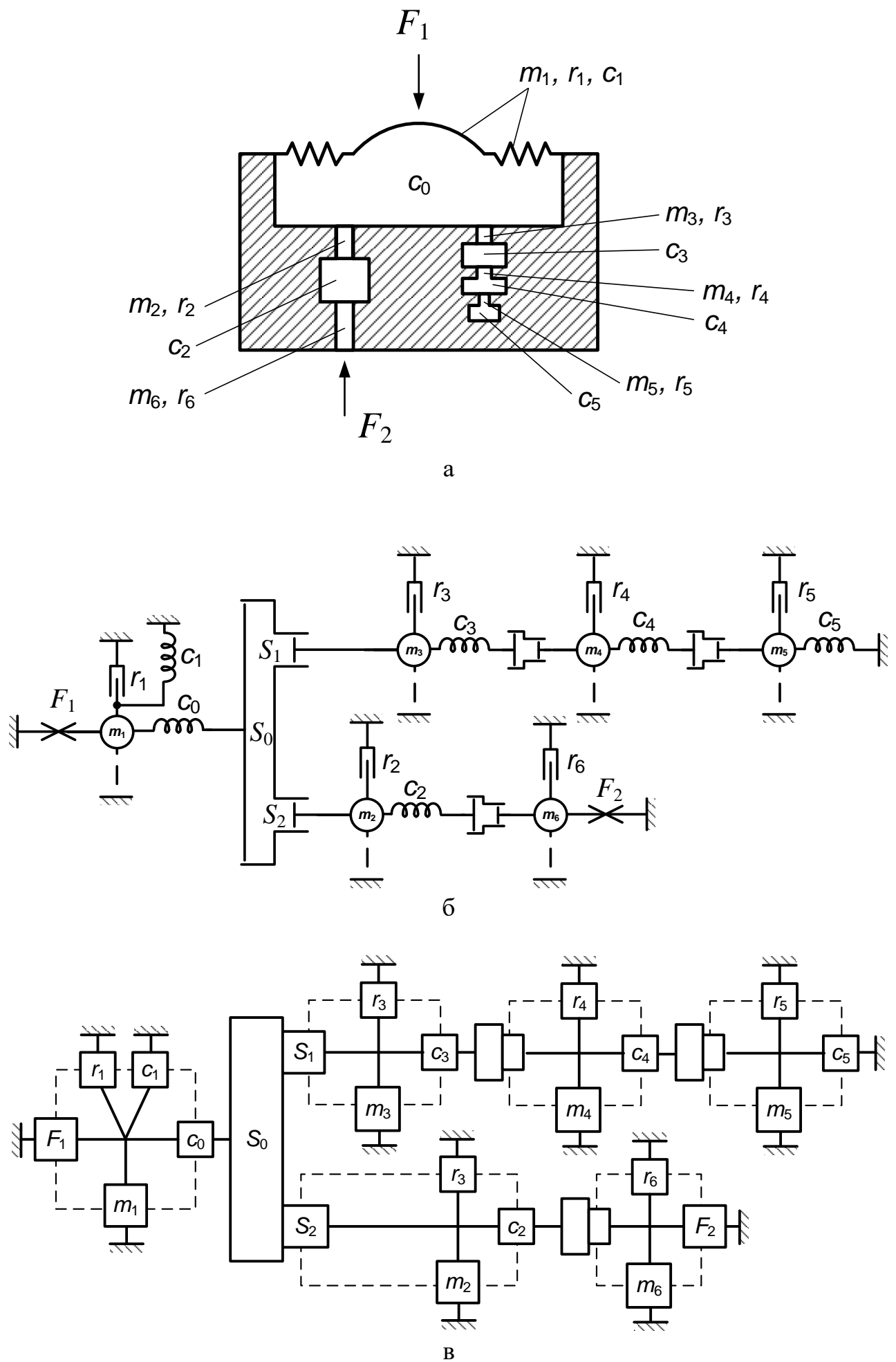


В



Г

Рисунок 1.10 - Приклад побудови схеми електричного аналога складної механічної системи з одним резонатором



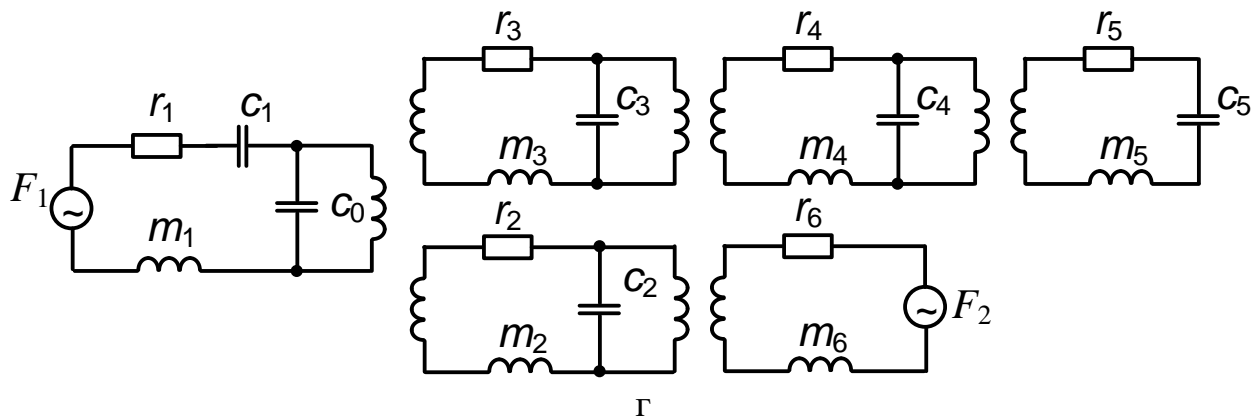


Рисунок 1.11 - Приклад побудови схеми електричного аналога складної механічної системи з декількома резонаторами

Контрольні питання

1. У чому полягає принцип оберненості для електромеханічного перетворювача?
2. Поясніть правила побудови схем електричних аналогів механічних коливальних систем.
3. Наведіть еквівалентні схеми перетворювача-двигуна і перетворювача-генератора.
4. Поясніть фізичний зміст внесеного опору для перетворювача-генератора і перетворювача-двигуна.
5. Поясніть принцип методу електромеханічних аналогій.
6. Які особливості акустичних коливальних систем у порівнянні з механічними?
7. Наведіть приклади з'єднання механічних елементів та їх електричних аналогів у схемах.

2 МІКРОФОНИ

2.1 Загальні відомості, класифікація та технічні характеристики мікрофонів

Мікрофон - електроакустичний перетворювач, що перетворює акустичні коливання повітряного середовища в електричні сигнали.

Мікрофон є першим і одним з найбільш важливих ланок будь-якого електроакустичного тракту, що визначає, як правило, показники якості тракту в цілому. Існують різні типи мікрофонів, які знаходять широке застосування в системах радіомовлення, телебачення, телефонії, озвучення, звукопідсилення, запису і тощо

Історія створення мікрофона починається з 1876 р., коли А. Белл (А. Bell) продемонстрував на виставці в Філадельфії рідинний перетворювач. В цей же час він запатентував обернений перетворювач з рухомою арматурою. Потім в період з 1881 р. по 1888 р. на фірмі Bell Telephone System у результаті робіт Берлинера, Хьюза, Блейка (Berliner, Hughes, Blake) був створений вугільний мікрофон. Тоді ж Хьюзом був запропонований термін «мікрофон» для електроакустичних приймачів.

У 20-і роки XX століття на фірмі Western Electric (США) були розроблені динамічні і конденсаторні мікрофони (перший конденсаторний мікрофон був створений Вентом (Wente) в 1917 р.). Серійний випуск їх почався в 1947 р., коли фірма AKG запустила у виробництво свій перший конденсаторний мікрофон.

У 1942 р. був випущений стрічковий мікрофон фірми RCA (винахідник Г. Олсон), в 1962 р. з'явився електретний мікрофон фірми Bell Lab (інженери Сесслер, Вест (Sessler, West)) і, нарешті, в 2000-му - цифровий мікрофон (фірми Neumann).

Мікрофони класифікують за такими ознаками:

- 1) **спосіб перетворення механічних (акустичних) коливань в електричні:**
 - електродинамічні (котушкові і стрічкові),
 - конденсаторні (в тому числі і електретні),
 - електромагнітні,
 - п'єзоелектричні,
 - вугільні,
 - напівпровідникові (транзисторні);
- 2) **спосіб приймання звукових коливань або впливу звукових коливань на діафрагму:**
 - приймачі тиску,
 - приймачі градієнта тиску,
 - комбіновані;
- 3) **вид діаграми спрямованості (ДС) (або направленості - ДН):**
 - неспрямовані (кругові - omnidirectional),
 - двостороннеспрямовані (вісімкові або косинусоїдні - bidirectional),
 - одностороннеспрямовані (кардіоїдні - unidirectional),
 - гостроспрямовані;
- 4) **конструктивне виконання** (ручні, вбудовані, стійкові, настільні, петличні, інструментальні, для гарнітури, PZM, параболічні);
- 5) **функціональне призначення** (область застосування);
 - студійні;

- концертні;
- мовні;
- репортажні;
- службового зв'язку;
- систем озвучення;
- вимірювальні;
- спеціальні.

б) *група складності* (побутові, професійні);

Широке застосування в сучасній практиці звукозапису отримали **радіомікрофони**, що забезпечують передачу сигналів із застосуванням частотної модуляції високочастотних хвиль (зазвичай, в діапазоні 450...950 МГц) звуковими коливаннями. Це дозволяє забезпечити безпроводове передавання сигналів на відстані до 100 м і більше. Аналогічно використовують системи безпроводового передавання в інфрачервоному діапазоні.

До мікрофонів висувають дуже жорсткі вимоги:

- за **технічними параметрами** (великий динамічний діапазон - до 100 дБ; широкий частотний діапазон - не менше 20...20000 Гц; малі нелінійні спотворення - менше 1% тощо);
- за **естетичними критеріями** (тому що мікрофон постійно видно глядачам на сцені, на екрані телевізора тощо);
- за **надійністю** (оскільки мікрофон піддається різноманітним кліматичним і механічним впливам: вітер, вологість, температура, тряска, удари тощо);
- за **якістю звукопередавання** (для збереження природного тембру при передаванні музики різних жанрів, співу, мови тощо).

Наведемо основні **технічні показники** (параметри) мікрофонів.

Вимоги до параметрів мікрофонів і методам їх вимірювань викладені в міжнародних і вітчизняних стандартах МЕК (IEC)-60268, МЕК (IEC)-60581, DIN 45500, ANSI S1.12-97, AES-X85 і ін. У міжнародних стандартах нормують тільки методи вимірювань, параметри визначає фірма-виробник. В умовах жорсткої конкуренції ці параметри постійно поліпшують.

Чутливість (sensitivity) - відношення напруги на виводах (клемах) мікрофона U до звукового тиску $p_{зв}$, що діє на мікрофон:

$$E = \frac{U}{p_{зв}} \left[\frac{\text{мВ}}{\text{Па}} \right].$$

Чутливість визначають або за напругою холостого ходу (ЕРС), або за напругою на номінальному навантаженні. За номінальне навантаження приймають модуль внутрішнього опору мікрофона на частоті 1 кГц.

Залежно від умов вимірювань чутливість може бути по *вільному полю* або по *дифузному полю*. У вільному полі переважає пряма звукова хвиля, а відбиті хвилі відсутні або малі такі, що ними можна знехтувати. Для дифузного поля щільність звукової енергії в усіх напрямках однакова і в усіх напрямках поширюються однакові потоки енергії в одиницю часу.

Чутливість по тиску - чутливість при звуковому тиску, що діє тільки на поверхню звукосприймального елемента (мембрани, діафрагми) і розподіленим по ньому рівномірно.

Чутливість залежить від частоти, тому введено поняття середньої чутливості - середньоквадратичне значення в номінальному діапазоні частот, що вимірюється на частотах діапазону, розподілених рівномірно в логарифмічному масштабі.

У міжнародних стандартах на мікрофони (МЕК 60268-4) наведено таке визначення чутливості (sensitivity): «середньоквадратичне (RMS - root-mean-square) значення напруги на виході мікрофона на опорі навантаження 1 кОм на частоті 1 кГц, коли на нього діє тиск 1 Па (94 дБ) в умовах вільного поля (кут прийому 0°)».

Рівень чутливості - чутливість, виражена в децибелах щодо величини 1 В/Па.

$$N_E = 20 \lg \frac{E}{E_0} = 20 \lg \frac{E}{1} = 20 \lg E \text{ [дБ]}.$$

Стандартний рівень чутливості - виражене в децибелах відношення напруги $U_{\text{ном}}$, що розвивається на номінальному опорі навантаження $R_{\text{ном}}$ при звуковому тиску 1 Па, до напруги, що відповідає потужності $P_0 = 1$ мВт, тобто рівень потужності, що віддає мікрофон в номінальне навантаження при $p_{\text{зв}} = 1$ Па,

$$N_{\text{ст}} = 20 \lg \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{R_{\text{ном}} \cdot P_0}} = 20 \lg \frac{E_{\text{ном}}}{\sqrt{R_{\text{ном}} \cdot 10^{-3}}} \text{ [дБ]}$$

або $N_{\text{ст}} = 10 \lg \frac{U_{\text{ном}}^2}{R_{\text{ном}} \cdot P_0},$

де $U_{\text{ном}}$ - напруга на номінальному навантаженні, $E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}}/(p_{\text{зв}} = 1 \text{ Па}) = U_{\text{ном}}/1 = U_{\text{ном}}$ - «номінальна» чутливість.

Зазвичай, чутливість сучасних конденсаторних мікрофонів знаходиться в межах від 8 до 40 мВ/Па, динамічних – від 0,1 до 5 мВ/Па. Наприклад, мікрофон DPA Type 3530 має чутливість 10 мВ/Па і рівень чутливості (- 40 дБ) (на холостому ходу), мікрофон С-3000В фірми AKG - 25 мВ/Па (-32 дБ).

Внутрішній опір мікрофона Z_i . Для більшості мікрофонів цей опір є активним і практично не залежить від частоти. У разі залежності Z_i від частоти, наводиться середнє значення Z_i або модуль на частоті 1000 Гц.

Повний електричний опір мікрофона визначається як відношення величини напруги на виході мікрофона до наслідкового струму. Величина вихідного електричного імпедансу (output electrical impedance), тобто модуля повного електричного опору, в більшості сучасних конденсаторних мікрофонах знаходиться в діапазоні 50...200 Ом, у динамічних мікрофонах до 600 Ом. При цьому вхідний опір передпідсилювачів (input recommended load impedance) має бути більше вихідного опору мікрофона в 5-10 разів і становить зазвичай

1000...2000 Ом. При такому співвідношенні опорів забезпечено мінімальні втрати в кабелі.

Залежність чутливості мікрофона від кута падіння звукової хвилі визначають за таких параметрів:

Характеристика спрямованості - залежність чутливості мікрофона у вільному полі від кута θ між робочою віссю і напрямком на джерело звуку.

Нормовану характеристику спрямованості оцінюють відношенням чутливості мікрофона E_θ , виміряної при приході звуку під кутом θ , до осьової чутливості $E_{ос}$:

$$R(\theta) = \frac{E_\theta}{E_{ос}}.$$

Більшість мікрофонів мають осьову симетрію, тому характеристика спрямованості для них однакова у всіх площинах.

Графічне представлення характеристики спрямованості часто подають в полярних координатах (рис.2.1), і такий графік називають **діаграмою спрямованості**.

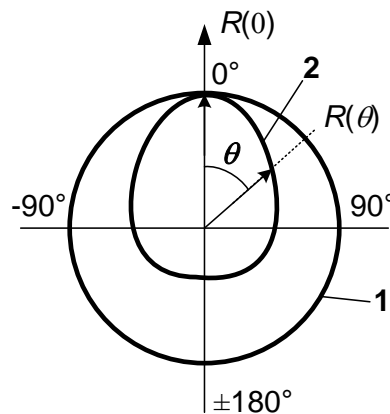


Рисунок 2.1 - Діаграма спрямованості мікрофона

Через спрямованість мікрофона його чутливість по дифузному полю $E_{диф}$ буде менше осьової чутливості. Для урахування величини цього зменшення введено **коефіцієнт спрямованості**

$$\Omega = \frac{E_{ос}^2}{E_{диф}^2}.$$

В деяких літературних джерелах цей коефіцієнт називають **коефіцієнтом осьової концентрації**.

Цей коефіцієнт визначають на низькій частоті або для смуги частот.

Коефіцієнт спрямованості, виражений в децибелах, називають **індексом спрямованості** (індексом осьової концентрації):

$$Q_m = 10 \lg \Omega = 10 \lg \frac{E_{ос}^2}{R_{ном} P_0} - 10 \lg \frac{E_{диф}^2}{R_{ном} P_0} = N_{ос} - N_{диф}.$$

Індекс спрямованості показує різницю в рівнях потужності, що розвиває мікрофон під дією двох джерел звуку: одного, розташованого на осі, і іншого - джерела розсіяних звукових хвиль, якщо обидва створюють в точці розташування мікрофона однаковий тиск. Іншими словами, *індекс спрямованості* показує величину зменшення шуму відносно сигналу, що приходить по осі мікрофона.

Для неспрямованого мікрофона $N_{oc} = N_{диф}$, а індекс спрямованості дорівнює нулю. Такий мікрофон не обмежує шум відносно сигналу.

Перепад чутливості "фронт / тил" - відношення осьової чутливості мікрофона до чутливості E_{180} (під кутом 180° до його осі):

$$Q_{0^\circ/180^\circ} = 20 \lg \frac{E_{oc}}{E_{180^\circ}} = N_{oc} - N_{180^\circ}.$$

Вибір мікрофонів з різними характеристиками спрямованості визначено умовами запису: розташуванням джерел (наприклад, інструментів в оркестрі), шириною звуковий панорами, рівнем шумів в навколишньому просторі, прагненням отримати спеціальні звукові ефекти тощо. Саме тому в даний час промисловість виробляє величезну номенклатуру мікрофонів з різними (навіть такими, що можуть перемикатися на одному мікрофоні) видами характеристик спрямованості.

Номінальний діапазон частот (frequency range) - частотний діапазон, в якому визначають параметри мікрофона (визначає виробник).

Частотна характеристика (frequency response) - залежність рівня чутливості від частоти. Її нерівномірність визначають в номінальному частотному діапазоні для даного типу мікрофона.

З записаної частотні характеристики чутливості визначають **нерівномірність частотної характеристики** – це різниця між максимальним і мінімальним значенням рівня чутливості в номінальному діапазоні частот. Зазвичай частотна характеристика чутливості (ЧХЧ) високоякісних мікрофонів має мінімальну нерівномірність, це є одним з головних ознак якості мікрофонів, оскільки визначає ступінь неспотвореної передачі тембру джерела; проте в деяких випадках, наприклад, для запису мови і вокалу, забезпечують підйом на ЧХЧ в області 2...8 кГц з метою збільшення розбірливості (presence peak). Крім того, у більшості сучасних мікрофонів передбачено можливість зниження рівня ЧХЧ на низьких частотах для запису в умовах шумів, а також для усунення ефекту «ближкості» (proximity effect), властивого спрямованим мікрофонам.

Рівень максимального звукового тиску (max SPL - sound pressure level) - рівень звукового тиску, за якого коефіцієнт гармонічних спотворень не перевищує заданого значення.

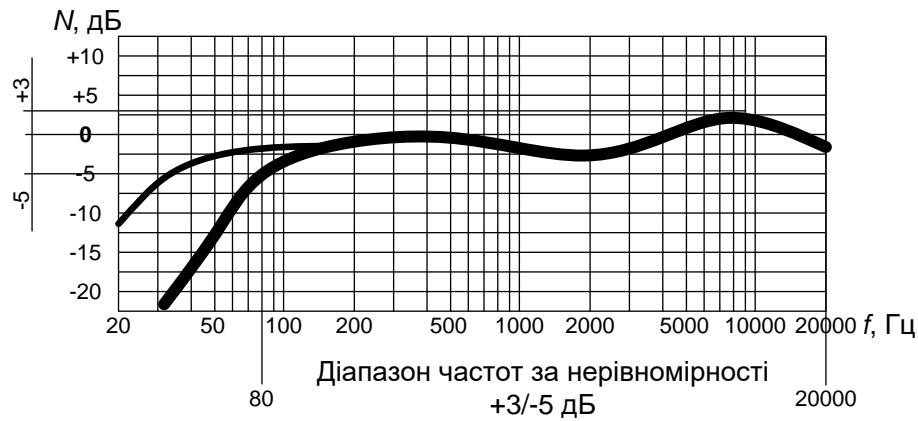


Рисунок 2.2 - Форма частотної характеристики чутливості мікрофона

Повний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) визначають за методикою, яку використовують для визначення чутливості, але при цьому аналізатором спектра вимірюють напругу на виході мікрофона першої гармоніки U_1 , другої - U_2 і т. д. Коефіцієнт розраховують за формулою:

$$K_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n (U_i)^2}}{U_1}.$$

Зазвичай, величина коефіцієнта гармонічних спотворень для сучасних мікрофонів задають менше 0,5% за максимально допустимих рівнів звукового тиску (max SPL). Прикладом є значення max SPL для мікрофона фірми DPA Type 4004 Ht-SPL: 142 дБ (<0,5% THD), 148 дБ (<1% THD);

Навіть за відсутності будь-якого акустичного сигналу поблизу мікрофона напруга на його виході не дорівнює нулю. Наявність напруги спричинено флуктуаціями частинок в навколишньому середовищі і тепловими шумами в електричній частині мікрофона.

Рівень власних завад (шумів), приведений до акустичного входу, визначають як рівень еквівалентного звукового тиску шуму $p_{ш}$, в разі дії якого на мікрофон утворено вихідну напругу мікрофона $U_{ш}$, що розвивається їм у відсутності звукових коливань, тобто

$$L_{ш} = 20 \lg \frac{p_{ш}}{p_0},$$

де $p_{ш} = \frac{U_{ш}}{E_{oc}}$, а $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Це означає, що вимірюють напругу на виході мікрофона за відсутності звукового тиску, зумовлену тільки внутрішніми шумами, і потім визначають, якому звуковому тиску вона могла б відповідати.

Визначимо відповідність акустичного рівня власного шуму мікрофона стандартному рівню чутливості і рівню електричної потужності шумів:

$$N_{ш.ос} = N_{е.ш} - N_{ос} = L_{ш} + 20 \lg p_0 = L_{ш} - 94,$$

де $N_{ш.ос}$ - акустичний рівень власних шумів, визначений через електричні параметри;

$N_{е.ш}$ - рівень електричної потужності шумів, $N_{е.ш} = 10 \lg \frac{U_{ш}^2}{R_{ном} \cdot P_0}$, $P_0 = 1$ мВт;

$N_{ос}$ - стандартний рівень осьової чутливості;

$L_{ш}$ - рівень еквівалентного акустичного шуму.

У міжнародних стандартах на мікрофони, зазвичай, зазначають такі величини: *еквівалентний рівень шуму* (Equivalent Noise Level) і *відношення «сигнал/шум»* (Signal/Noise ratio). Способи вимірювання дещо відрізняються в різних стандартах, тому зазвичай в сучасних каталогах наводяться два значення еквівалентного рівня шумів: за стандартом DIN 45412 (IEC 651) і за стандартом DIN 45405 (CCIR 468-2). Наприклад, для конденсаторного мікрофона С-3000В фірми AKG еквівалентний рівень шумів за стандартом IEC-651 (DIN45-412) становить 14 дБ-А, а за стандартом CCIR468-2 (DIN45-405) - 25 дБ.

Для характеристики власних шумів мікрофонів застосовують також відношення «сигнал/шум», яке теж обчислюють двома способами:

- **S/N ratio (DIN / IEC651)** - відношення «сигнал/шум», що обчислюють як різницю між опорним рівнем звукового тиску 94 дБ (1 Па) і еквівалентним рівнем шуму, виміряним за IEC 651;
- **S/N ratio (CCIR 468-2)** - відношення «сигнал/шум», що обчислюють як різницю між рівнем 94 дБ і еквівалентним рівнем шуму, виміряним за CCIR 468-2.

Для студійних конденсаторних мікрофонів ці величини знаходяться в межах від 74 до 84 дБ (DIN / IEC 651) і від 64 до 74 дБ (CCIR). Наприклад, для того ж мікрофона С-3000В ці значення складають 80 дБ (DIN / IEC 651) і 69 дБ (CCIR).

Динамічний діапазон (dynamical range) - різниця між максимальним рівнем звукового тиску (max SPL), за якого нелінійні спотворення на виході мікрофона не перевищують задану величину, і еквівалентним рівнем шуму. Наприклад, для мікрофона фірми С-3000В він дорівнює 120 дБ.

Крім зазначених вище електроакустичних параметрів, для мікрофонів визначають, зазвичай, *робочий діапазон зміни температури і вологості навколишнього середовища*, всередині якого чутливість не повинна змінюватися більш ніж на ± 2 дБ. Електродинамічні мікрофони всіх груп складності мають робочий діапазон, як правило, від -40° до $+50^\circ\text{C}$ за температурою і 95% вологості при 20°C , конденсаторні – від -10°C до $+35^\circ\text{C}$ і 85% вологості при 20°C .

Для більшості мікрофонів осьову чутливість мікрофона можна представити як добуток чутливості окремих ланок, що входять в нього:

$$E_{ос} = \frac{U}{p} = \frac{F}{p} \cdot \frac{v}{F} \cdot \frac{\varepsilon}{v} \cdot \frac{U}{\varepsilon},$$

$\frac{F}{p}$ - акустична чутливість;

$\frac{v}{F} = \frac{1}{z_{\text{мех}}}$ - механічна чутливість; $z_{\text{мех}}$ - механічне опір рухомої системи

мікрофона;

$\frac{\varepsilon}{v} = K$ - коефіцієнт електромеханічного зв'язку; ε - ЕРС на клеммах мікрофона, v - коливальна швидкість рухомої частини мікрофона;

$\frac{U}{\varepsilon} = \frac{R_n}{R_n + Z_i}$ - електрична навантажувальна характеристика, R_n - опір навантаження, Z_i - внутрішній опір мікрофона.

Зазвичай, підбирають чутливість ланок так, щоб загальна чутливість мікрофона мала мінімальну залежність від частоти, для чого використовують метод взаємної корекції частотних характеристик окремих ланок.

Світова аудіопромисловість випускає в даний час десятки мільйонів мікрофонів в рік, асортимент налічує сотні моделей. Випуском мікрофонів займаються десятки фірм: серед них такі знамениті як AKG, Sennheiser Electronics, B & K, Neumann, Beyerdynamic, DPA Microphone, Shure, Sony тощо.

Параметри однієї з розробок фірми AKG - C-3000B наведено в таблиці 2.1.

Сучасний мікрофон має досить складну конструкцію. Конструкція сучасного мікрофона, наприклад, C-3000B фірми AKG, містить капсуль електростатичного типу, передпідсилювач, ізолювальний екран, систему амортизаторів для кріплення капсуля, рознім, корпус із захисною сіткою тощо.

У цифровому мікрофоні, наприклад моделі «Solution-D» фірми Neumann замість попереднього підсилювача в корпусі встановлені АЦП і цифровий процесор для попередньої обробки звуку.

Різноманіття конструкцій мікрофонів, що випускає в наш час промисловість, надзвичайно велика і продовжує постійно збільшуватися.

Таблиця 2.1 - Параметри моделі C-3000B

Transducer type (тип перетворювача):	pressure gradient (градієнт тиску)
Sensitivity (чутливість)	25 мВ/Па (-32 дБВ)
Frequency response (частотна характеристика)	20 Гц ... 20 кГц
Polar pattern (полярна діаграма):	кардіоїда
Pre-attenuation (спад на НЧ):	-10 дБ
Impedance (імпеданс):	< 200 Ом
Recommended loading (рекомендоване навантаження):	> 1000 Ом
Equivalent noise level (A-weighted) (еквівалентний рівень шумів) - IEC-651	14 дБ-А
Equivalent noise level (еквівалентний рівень шумів) CCIR-468-2	25 дБ

Sound pressure level for 0,5% THD (рівень звукового тиску для КНС 0,5%):	140 дБ (150 дБ із загасанням -10 дБ)
S/N ratio (A-weighted) (сигнал/шум)	80 дБ-А
Power requirement (фантомне живлення):	9-52 В
Environmental (температура навколишнього середовища):	-10 °C ...+60 °C, вологість 90% (+20 °C)
Output connector (зовнішній рознім):	3-pin XLR
Size (розмір)	53 × 162 мм
Net weight (маса)	320 г
Included accessories (аксесуари):	HI 00 elastic mounting suspension (пружна підвіска)
Optional accessories (додаткові аксесуари)	B18 battery power supply (живлення), PF100 pop filter (захист від вибухових звуків «п», «б») W414 windscreen (захист від вітру)

Мікрофон як електромеханічний перетворювач

За визначенням чутливість мікрофона дорівнює відношенню напруги на виході мікрофона до діючого на нього звукового тиску

$$E = \frac{U}{p_{зв}}.$$

При роботі мікрофона на навантаження напруга на його виході (див. рис. 1.6, б)

$$U = U_0 \frac{Z_H}{Z_0 + Z_H}.$$

Згідно виразу щодо визначення коефіцієнта електромеханічного зв'язку $U_0/v = 1/D = K$, напруга холостого ходу

$$U_0 = Kv.$$

У свою чергу, як впливає з

$$\frac{F}{v} = z_0 + z_{BH},$$

$$v = \frac{F}{z_0 + z_{BH}}.$$

Діюча на мікрофон сила пропорційна звуковому тиску у вільному звуковому полі:

$$F = a_{ак} p_{зв} = S p_{зв} = p_{зв} S,$$

де $a_{ак}$ - коефіцієнт пропорційності, що має розмірність площі S і його називають **акустичною характеристикою**.

Переписавши вираз для напруги U на виході мікрофона при роботі без навантаження з урахуванням отриманих формул для U_0 , ν , F , отримаємо

$$U = Kv \frac{Z_H}{Z_0 + Z_H} = K \frac{F}{z_0 + z_{BH}} \cdot \frac{Z_H}{Z_0 + Z_{BH}} = K \frac{a_{ak} p_{зв}}{z_0 + z_{BH}} \cdot \frac{Z_H}{Z_0 + Z_{BH}} = a_{ak} \frac{K}{z_0 + z_{BH}} \cdot \frac{Z_H}{Z_0 + Z_{BH}} p_{зв},$$

де $\frac{K}{z_0 + z_{BH}} = a_{мех}$ - називають **механічною характеристикою** мікрофона;

$\frac{Z_H}{Z_0 + Z_{BH}} = a_{эл}$ - називають **електричною характеристикою** мікрофона.

Звідси може бути утворена узагальнена формула, яка визначає чутливість мікрофона:

$$E = \frac{U}{p_{зв}} = \frac{a_{ak} a_{мех} a_{эл} p_{зв}}{p_{зв}} = a_{ak} a_{мех} a_{эл} = a_{ak} \frac{K}{z + K^2/(z_0 + z_{BH})} \cdot \frac{Z_H}{Z_0 + Z_{BH}}.$$

2.2 АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОФОНА

Мікрофон як приймач звуку

Залежно від побудови акустичної частини розрізняють мікрофони-приймачі тиску (pressure microphone), мікрофони-приймачі градієнта тиску (pressure gradient microphone) і комбіновані мікрофони.

Характерною особливістю **приймача тиску** є те, що його рухома механічна система (діафрагма) відкрита для дії звукових хвиль тільки з одного боку (рис. 2.3, а). Внутрішній устрій мікрофона і спосіб електромеханічного перетворення в даному випадку значення не мають.

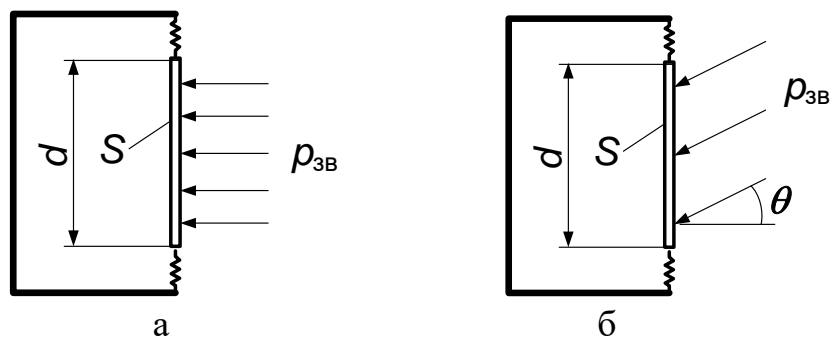


Рисунок 2.3 - Схематичне зображення приймача тиску

Для частот, на яких розміри діафрагми менше довжини хвилі, силу F , що діє на діафрагму, визначають як $F = p_{зв} S$, акустичну чутливість як $F / p_{зв} = S$. У цьому випадку тиск у мікрофона буде такий же, як і у вільному полі.

На низьких частотах, коли довжина хвилі набагато більше розмірів мікрофона, звукові хвилі з усіх напрямків приходять в однаковій фазі на мембрану в межах її площі, тобто мікрофон як би «не відчуває» напрямку їх приходу. Чутливість такого мікрофона однакова для всіх напрямків приходу

звукової хвилі; отже, характеристика спрямованості буде сферичною (являє собою кулю, в центрі якої знаходиться неспрямований мікрофон), тобто мікрофон буде неспрямованим.

Так, для отримання неспрямованого мікрофона в діапазоні частот до 10000 Гц ($\lambda = 3,4$ см) розміри мікрофона повинні бути менше 1,7 см. Мікрофони-приймачі тиску є неспрямованими тільки в області низьких частот, зі збільшенням частоти їх спрямованість загострюється.

Якщо ж розміри діафрагми можна порівняти з довжиною хвилі, то має місце явище інтерференції і силу, що діє на діафрагму в даному випадку, визначають як $F = (1...2)p_{зв}S$. Тобто відбувається накладення падаючої і відбитої від діафрагми хвиль.

Сила подвоюється в тому випадку, коли розміри діафрагми значно більше довжини хвилі, так як відбувається відбиття від діафрагми. Поблизу діафрагми утворюються стоячі хвилі, в пучності тиску яких вона виявляється. Це призводить до збільшення чутливості мікрофона $F/p_{зв} = (1...2)S$.

При падінні звуку на діафрагму під деяким кутом (рис. 2.3, б) різні точки діафрагми коливаються вже не в одній фазі, як це мало місце при осьовому падінні звуку, а з різними фазами.

Неважко обчислити різницю фаз φ крайніх точок діафрагми, що знаходяться на відстані d одна від одної:

$$\varphi = 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda}.$$

У цьому випадку сумарна сила, що діє на діафрагму, буде зменшуватися, мікрофон починає набувати спрямовані властивості (рис. 2.4).

Таким чином, для мікрофона-приймача тиску характерно збільшення чутливості і загострення ДС з ростом частоти.

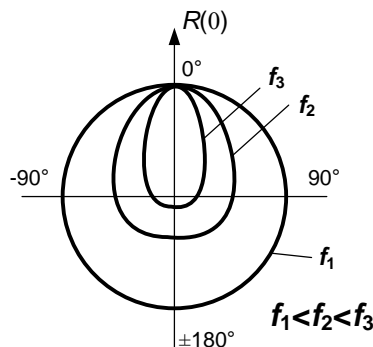


Рисунок 2.4 - Діаграма спрямованості мікрофони-приймача тиску на різних частотах

Такі мікрофони знаходять широке застосування в техніці звукозапису, особливо для запису звуків навколишнього (ревербераційного) простору і шумів.

Мікрофон-приймач градієнта звукового тиску

Визначимо особливості приймання звуку мікрофоном-*приймачем градієнта звукового тиску*.

Такий мікрофон можна представити у вигляді діафрагми, що розміщена в екрані кінцевих розмірів (рис. 2.5, а). Діафрагма відкрита для звукових хвиль з обох сторін (в корпусі мікрофона роблять отвори для доступу звукових хвиль до задньої частини мембрани), тому на неї впливає різниця сил, обумовлена різницею ходу звукових променів:

$$\Delta r = \delta \cos \theta.$$

Сила F , що викликає коливання діафрагми, дорівнює різниці (тобто градієнту) сил

$$F_1 = p_{\text{зв}} S \sin \omega t$$

і $F_2 = p_{\text{зв}} S \sin(\omega t - \varphi)$

при гармонійних коливаннях:

$$F = F_1 - F_2 = p_{\text{зв}} S [\sin \omega t - \sin(\omega t - \varphi)] = 2 p_{\text{зв}} S \sin \frac{\varphi}{2} \cos(\omega t - \frac{\varphi}{2}).$$

Різницю фаз визначають як

$$\varphi = 2\pi \frac{\delta \cos \theta}{\lambda}.$$

Тому

$$F = 2 p_{\text{зв}} S \sin(\pi \frac{\delta \cos \theta}{\lambda}) \cos(\omega t - \frac{\varphi}{2}).$$

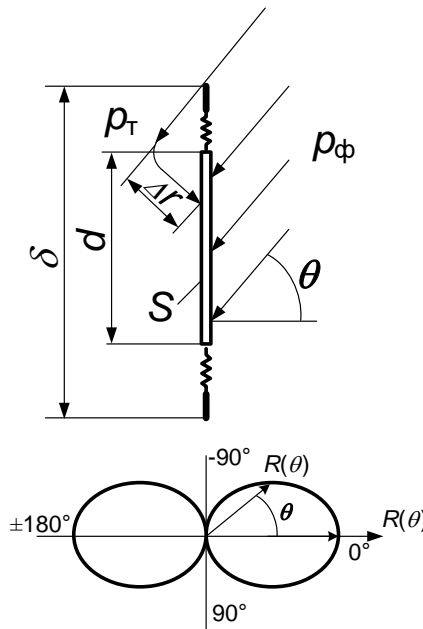


Рисунок 2.5 - Схематичне зображення приймача градієнта тиску і його діаграма спрямованості

Для діафрагм, розміри яких значно менше довжини хвилі, величина δ/λ мала і з деяким наближенням можна вважати, що

$$\sin(\pi \frac{\delta \cos \theta}{\lambda}) \approx \pi \frac{\delta \cos \theta}{\lambda}.$$

Звідси

$$F = p_{\text{зв}} S \frac{2\pi\delta}{\lambda} \cos\theta \cos(\omega t - \frac{\varphi}{2}) = F_m \cos(\omega t - \frac{\varphi}{2}),$$

де

$$F_m = p_{\text{зв}} S \frac{\omega\delta}{c_{\text{зв}}} \cos\theta.$$

Отже, амплітуда сили, що діє на діафрагму пропорційна частоті і косинусу кута між віссю мікрофона і напрямком приходу звуку.

Характеристика спрямованості мікрофона має вигляд "вісімки" («figure eight») (рис. 2.5 - графік косинусоїди у полярних координатах).

Мікрофон найбільш чутливий до звукових хвиль, що поширюються уздовж його робочої осі, і не сприймає коливань, що падають на нього з інших сторін, тобто під кутом $\theta = \pi/2$ (див. рис. М.5). Такі мікрофони знаходять досить широке застосування для стереозапису, наприклад, за системою MS.

Слід зауважити, що наведений висновок справедливий лише тоді, коли мікрофон розташовано в полі плоскої хвилі або на значній відстані від джерела сферичної хвилі, де кривизна фронту хвилі практично не визначена.

Нагадаємо, що в ближній зоні сферичної хвилі, де відстань від джерела звуку набагато менше довжини хвилі, звуковий тиск змінюється обернено пропорційно відстані. Зміна фази з відстанню тут ще незначна.

При найбільш поширеній відстані (близько 0,5 м від джерела звуку) для нижніх частот мікрофон буде перебувати в ближній зоні (на частоті 50 Гц довжина хвилі складе 6,8 м). Для верхніх частот, наприклад 10000 Гц, він буде вже перебувати в дальній зоні (довжина хвилі - 3,4 см). Тому на нижніх частотах силу, що діє на діафрагму мікрофона, буде в основному визначати різниця амплітуд звукового тиску, які залежать від різниці ходу фронтальної і тилової (обвідної) хвиль.

На верхніх частотах, де різниця фаз значна, зміною амплітуди можна знехтувати. Тому різницю тиску на обох сторонах діафрагми буде в основному визначено різницею фаз коливань. Звідси, якщо мікрофон поміщений поблизу від джерела звуку, то на нижніх частотах його чутливість буде вище, ніж на верхніх. Отже, мікрофони-приймачі градієнта тиску не можна розташовувати поблизу від джерела звуку, тому що мікрофон "підкреслює" нижні звукові частоти.

Якщо синтезувати характеристику спрямованості мікрофона шляхом комбінування неспрямованої і двобічної характеристики, то в осьовому фронтальному напрямку чутливість збільшується (оскільки сигнали приходять в однаковій фазі), а в тиловому напрямку чутливість зменшується, оскільки сигнали взаємно віднімаються, тому що їх фази протилежні.

Комбіновані мікрофони

Комбінованими називають мікрофони, складені з двох або більшого числа базових мікрофонів, що мають загальний вихід. Наведемо особливості спільної роботи двох мікрофонів, один з яких є приймачем тиску, а інший - приймачем

градієнта тиску. Мікрофони розташовані максимально близько один до одного (зазвичай, один над іншим) і їх осі паралельні. Будемо вважати, що приймач тиску має невеликі розміри і тому неспрямований у всьому діапазоні частот.

Нехай мікрофон, який є приймачем тиску, має чутливість E_T , не залежну від кута падіння звукової хвилі, а мікрофон, який працює як приймач градієнта тиску, має чутливість $E_{Г-Т} \cos \theta$. З'єднуючи ці мікрофони послідовно, отримуємо приймач з чутливістю

$$E_\theta = E_T + E_{Г-Т \text{ ос}} \cos \theta.$$

Осьова чутливість такого приймача

$$E_{\text{ос}} = E_T + E_{Г-Т \text{ ос}}.$$

Характеристика спрямованості комбінованого мікрофона

$$R(\theta) = \frac{E_\theta}{E_{\text{ос}}} = \frac{E_T + E_{Г-Т \text{ ос}} \cos \theta}{E_T + E_{Г-Т \text{ ос}}}.$$

Введемо параметр $q = \frac{E_{Г-д \text{ ос}}}{E_{\text{ос}}} = \frac{E_{Г-д \text{ ос}}}{E_d + E_{Г-д \text{ ос}}}$, що характеризує частку участі приймача градієнта тиску в значенні осьової чутливості $E_{\text{ос}}$.

Тоді чутливість комбінованого приймача буде визначено формулою

$$E_\theta = E_{\text{ос}}(1 - q + q \cos \theta),$$

а характеристика спрямованості такого приймача, відповідно

$$R(\theta) = \frac{E_\theta}{E_{\text{ос}}} = (1 - q) + q \cos \theta.$$

Змінюючи параметр q , можна отримати різноманітні характеристики спрямованості. Так, для $q = 0$ приймач градієнта тиску відсутній, тобто не працює, залишається лише приймач тиску, що не є спрямованим - характеристика спрямованості - кругова (рис. 2.6, а).

Для $q = 0,5$, що відповідає рівності осьової чутливості приймачів $E_T = E_{Г-д}$, характеристику спрямованості визначають як:

$$R(\theta) = \frac{E_\theta}{E_{\text{ос}}} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta).$$

Діаграма спрямованості зображує кардіоїду (рис.2.6, б).

Для $q = 0,63$, відношення чутливостей $\frac{E_T}{E_{Г-Т \text{ ос}}} = \frac{0,37}{0,63}$, а діаграма спрямованості зображує суперкардіоїду (рис. 2.6, в).

Для $q = 0,75$, відношення чутливостей $\frac{E_T}{E_{Г-Т \text{ ос}}} = \frac{0,25}{0,75}$, а діаграма спрямованості зображує гіперкардіоїду (рис. 26, г).

Нарешті, для $q = 1$ відсутній приймач тиску; характеристика спрямованості пристрою $R(\theta) = \cos \theta$, що відповідає діаграмі у вигляді вісімки (рис. 26, д).

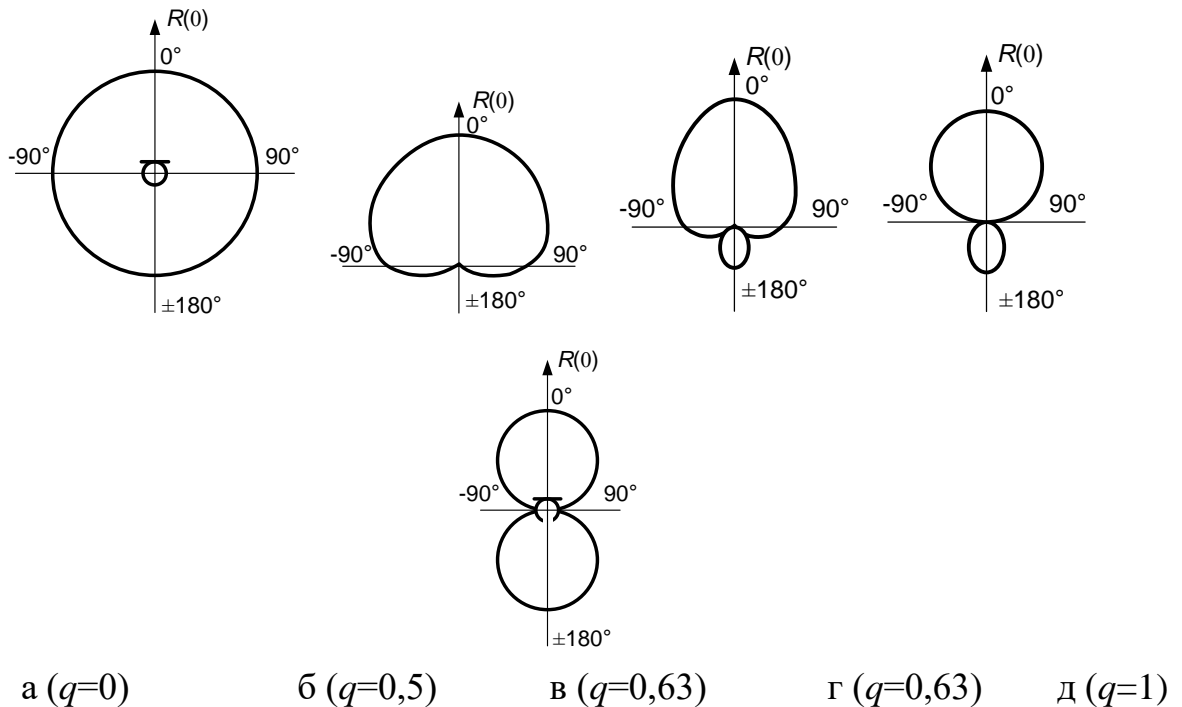


Рисунок 2.6 - Діаграми спрямованості мікрофонів
в залежності від значення q

Найпростішою для реалізації формою об'єднання мікрофонів є *електричне комбінування*, яке полягає в складанні (синфазному або протифазному) вихідних напруг цих мікрофонів і його здійснюють або безпосередньо, або з застосуванням електричних фазозсувних кіл і регуляторів.

Електричне комбінування дозволяє реалізувати досить цінну з експлуатаційної точки зору якість - можливість дистанційної зміни характеристик спрямованості. У тих випадках, коли мікрофони просторово не суміщені (утворюють лінійну групу), результуюча характеристика спрямованості дорівнює добутку характеристик спрямованості окремих мікрофонів. Ця властивість дозволяє формувати мікрофонну систему з більш вузькою діаграмою спрямованості.

Комбінований приймач за характеристикою спрямованості нічим не відрізняється від характеристики спрямованості асиметричного приймача градієнта тиску. Наприклад, якщо взяти неоднакові за довжиною внутрішній і зовнішній ділянки ходу звукової хвилі, то можна отримати суперкардіоїду і гіперкардіоїду.

Комбінований приймач можна отримати не тільки електричним способом, але і шляхом використання такої акустичної системи, при якій сила, що діє на приймач може бути розкладена на дві компоненти, одна з якої не залежить від кута падіння звукової хвилі, а інша – пропорційна $\cos \theta$.

Спрощено схему такого мікрофона можна змоделювати у вигляді діафрагми, що розміщена у відрізку трубки завдовжки δ (рис. 2.7, а).

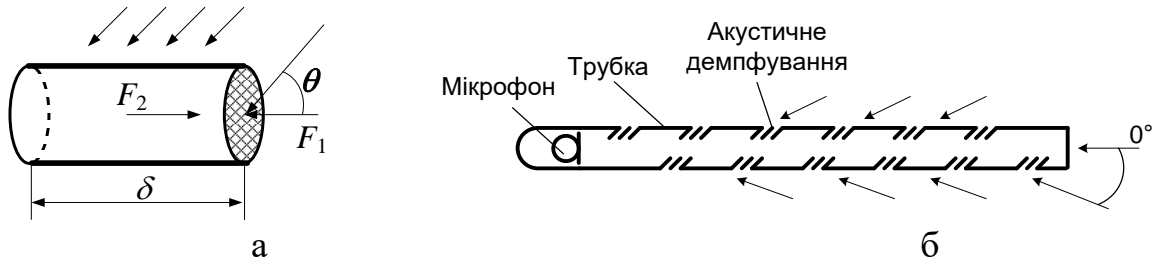


Рисунок 2.7 - Схематичне зображення односпрямованого приймача

Коливання діафрагми відбуваються під дією сили $F = F_1 - F_2$. Сили F_1 і F_2 , які діють на обидва боки діафрагми, відрізняються фазою.

Вочевидь, звуковій хвилі, що досягає тилового боку діафрагми, крім різниці ходу $\cos \theta$, отриманої для приймача градієнта тиску, слід пройти відстань, що дорівнює довжині трубки δ . Тому зсув фаз між сигналами F_1 і F_2 можна визначити як суму двох складових, одна з яких залежить від довжини трубки і постійна при всіх кутах прийому, а інша – пропорційна $\cos \theta$. Амплітуду різницевої сили визначають формулою

$$F_m = p_{зв} S \frac{\omega \delta}{c_{зв}} (1 + \cos \theta).$$

Характеристика спрямованості такого приймача описують вже знайомим нам виразом кардіоїди $1 + \cos \theta$.

Змінюючи площа відкритої частини трубки і її довжину, можна отримати мікрофон з необхідною ДС. Такі мікрофони називають *акустично комбінованими*.

Особливу групу мікрофонів складають *гостроспрямовані* мікрофони (shotgun): такі конструкції складаються з мікрофона-градієнта тиску, навантаженого на трубку з отворами (або прорізами), закритими тканиною (рис. 2.7, б). Трубка являє собою свого роду лінію затримки, так як при падінні звукових хвиль під кутом θ до осі мікрофона звукові хвилі досягають мембрани з різними зсувами фаз:

$$\Delta \varphi = \omega d_i \frac{1 - \cos \theta}{c},$$

де d_i - відстань від початку трубки до i -отвору, c - швидкість звуку, ω - кутова частота.

Цей додатковий зсув фаз збільшує градієнт сил, які впливають на діафрагму мікрофона, і «загострює» характеристику спрямованості. Тканина на отворах трубки є додатковим акустичним опором, який зростає в міру наближення до капсуля мікрофона.

Ще одним різновидом є *параболічні* мікрофони, в яких кардіоїдний мікрофон розташовують у фокусі параболічного рефлектора (рис. 2.8, а), що загострює його характеристику спрямованості. Слід зазначити, що ефективність гостроспрямованих мікрофонів обернено пропорційна довжині падаючої звукової хвилі: якщо вона більше розмірів трубки або рефлектора, то

загострення характеристики спрямованості не відбувається, тобто на низьких частотах вони неефективні.

Спрямовані мікрофони мають ще одну властивість - залежністю їх рівня чутливості від відстані до джерела. Цю властивість називають «ефектом близькості» (proximity effect) і його пояснюють тим, що на близькій відстані мікрофон знаходиться в «ближній зоні» дії джерела, тобто в зоні поширення сферичної хвилі. У сферичній хвилі звуковий тиск зменшується з відстанню: $p \sim 1/r$, тому різниця тиску, що діє на лицьову сторону мембрани і тиску, що діє на її тильну сторону, збільшено внаслідок додаткової різниці (градієнта) тисків, що виникають у сферичній хвилі через різницю відстаней. Тому чутливість спрямованого мікрофона на низьких частотах зростає; у міру підвищення частоти ефект перестає відчуватися та при використанні спрямованих мікрофонів на близьких відстанях необхідно враховувати підйом частотної характеристики на низьких частотах (вводячи при запису необхідну корекцію).

До числа оригінальних конструкцій, що набули широкого поширення в студійній практиці, можна віднести мікрофони приграничного шару (PZM - Pressure Zone Microphone). Конструкція мікрофона (рис. 2.8, б) містить екран з встановленим паралельно йому на близькій відстані капсулом мікрофона (зазвичай, конденсаторного). Таке встановлення дозволяє збільшити на 6 дБ рівень звукового тиску, що діє на мікрофон внаслідок відбитої хвилі і сформувати напівсферичну діаграму спрямованості, яка практично не залежить від частоти (прикладом може служити модель Neumann GFM 132).

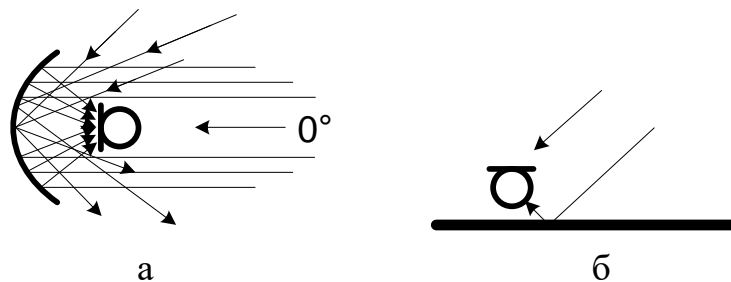


Рисунок 2.8 - Параболічний мікрофон (а) і мікрофон приграничного шару (PZM) (б)

2.3 ПРИНЦИП ДІЇ ТА КОНСТРУКЦІЇ МІКРОФОНІВ

Першим отримав поширення **вугільний мікрофон**, який і досі використовують в проводовій телефонії. У вугільному мікрофоні (рис. 2.9, а) в разі дії звукового тиску на діафрагму **1** вона починає коливатися. В такт цим коливанням змінюється сила стиснення зерен вугільного порошку **2**, в результаті чого змінюється опір між електродами **3** і **4** і струм через мікрофон (**5** - корпус мікрофона).

Основна перевага вугільного мікрофона - висока чутливість, що дозволяє використовувати його без підсилювачів (при передачі мови рівень вихідної напруги близький до 0 дБ). Недоліки - великий рівень шуму, значна нерівномірність частотної характеристики і підвищені нелінійні спотворення.

Частотна характеристика вугільного мікрофона знаходиться в діапазоні від 300 Гц до 3400 Гц, нелінійні спотворення досягають на НЧ 20%, динамічний діапазон - 30 дБ.

Ці недоліки вугільного мікрофона призвели до того, що там, де потрібна висока якість перетворення, наприклад в радіомовленні, при звукозапису і вимірюваннях, його не застосовують.

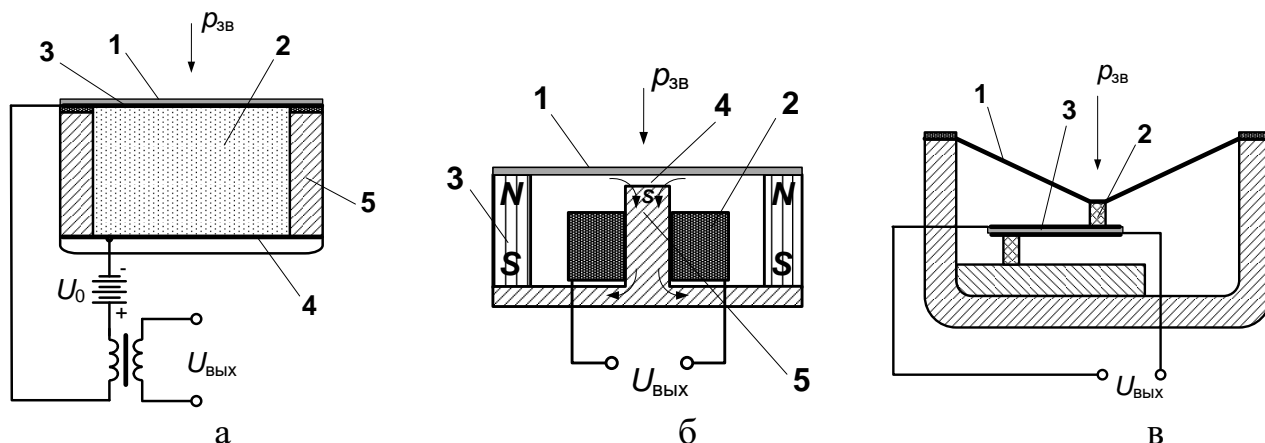


Рисунок 2.9 - Конструкції мікрофонів: а - вугільного, б - електромагнітного, в - п'єзоелектричного

Наступним після вугільного винайшли **електромагнітний мікрофон** (рис. 2.9, б). У ньому феромагнітну діафрагму **1** розташовують перед полюсами магнітної системи, що складена з магніту **3** і керна **5**, який виконує роль полюсного наконечника. При коливаннях діафрагми змінюється магнітне опір повітряного зазору **4**, а, значить, і магнітний потік через витки обмотки **2**, що намотана на магнітопровід (кern - **5**) цієї системи. Завдяки цьому виникає змінна напруга звукової частоти, що є вихідним сигналом мікрофона.

Електромагнітний мікрофон стабільний в роботі, однак йому властиві вузький частотний діапазон, велика нерівномірність частотної характеристики і значні нелінійні спотворення. Цим пояснюється те, що область застосування електромагнітних мікрофонів обмежена. Частотна характеристика електромагнітного мікрофона приведена на рис. 2.10 (пунктирною (2) лінією показано оптимальна ЧХ).

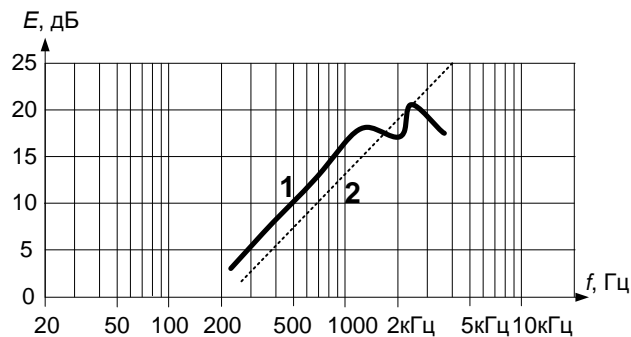


Рисунок М.10 - Частотний діапазон електромагнітного мікрофона

Деяке поширення отримали **п'єзоелектричні мікрофони** (рис. 2.9, в). Їх дія заснована на тому, що звуковий тиск впливає безпосередньо або через діафрагму **1** і скріплений з нею стрижень **2** на п'єзоелектричний елемент **3**. При деформації останнього виникає напруга, яка і є вихідною напругою мікрофона. Область застосування п'єзоелектричних мікрофонів останнім часом розширено завдяки появі використовуваних для діафрагм нових синтетичних плівкових покриттів, яким притаманний п'єзоелектричний ефект.

Робота **транзисторних мікрофонів** ґрунтується на тому, що під дією звукового тиску на діафрагму, скріплене з нею вістря, що є одночасно емітером напівпровідникового транзистора, змінює опір емітерного переходу (рис. 2.11, а). Хоча такі мікрофони досить чутливі, в роботі вони не стабільні і мають вузьку й нерівномірну частотну характеристику.

Слід зауважити, що вугільний і транзисторний мікрофони є незворотними перетворювачами і їх відносять до, так званих, релейних перетворювачів. Як зрозуміло з попереднього, обидва типи мікрофонів є пристроями, що управляють енергією джерел струму.

Перераховані вище принципи перетворення використовують в переважній більшості мікрофонів, що серійно випускають. З нових напрямків можна відзначити появу оптичних мікрофонів, робота зі створення яких активно проводяться в останні роки на фірмі Sennheiser. Принцип дії оптичного мікрофона ілюструє рис. 2.11, б. Промінь лазера падає на діафрагму, при коливаннях якої модулюється відбитий світловий потік, потім за допомогою фотодіода його перетворюють на змінний електричний сигнал. Перші зразки таких мікрофонів вже були продемонстровані фірмою Sennheiser на конгресах AES.

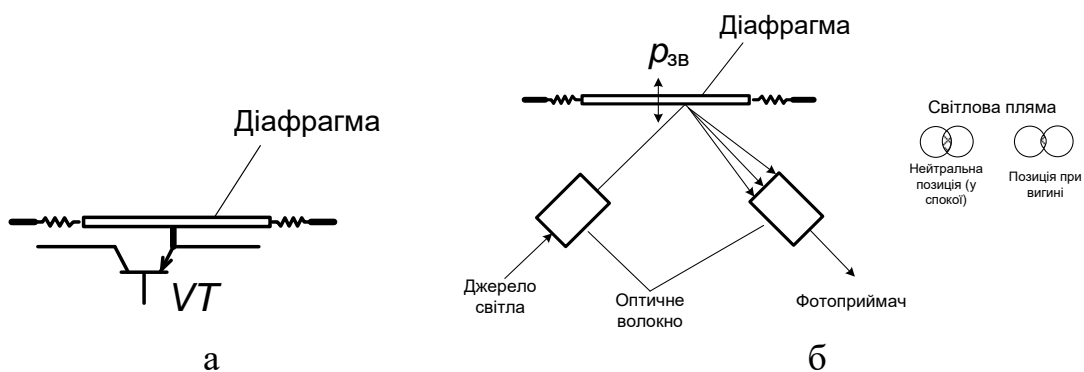


Рисунок 2.11 - Конструкції мікрофонів: а - транзисторного, б - оптичного

Широке поширення в звуковому мовленні отримав *електродинамічний мікрофон* двох модифікацій - **катушковий** (рис. 2.12) і **стрічковий** (рис. 2.17).

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ КОТУШКОВИЙ МІКРОФОН

У кільцевому зазорі **4** магнітної системи електродинамічного катушкового мікрофона (рис. 2.12), що містить постійний магніт **3** і полюсні наконечники **3'** і **3''**, знаходиться рухома катушка **2**, яку жорстко скріплено з діафрагмою **1**. В разі дії на діафрагму звукового тиску вона разом з рухомою катушкою починає коливатися. Під час руху провідника зі струмом в магнітному полі в ньому індукується електричний сигнал, тобто у витках катушки створюється напруга, що є вихідним сигналом мікрофона.

У повітряному зазорі магнітної системи створюється магнітне поле з радіальним напрямком відносно катушки.

Діафрагма має куполоподібну форму для підвищення жорсткості. Діафрагму виготовляють з міцних матеріалів, наприклад, полістиролу. Гофрований підвіс дає можливість вільного переміщення діафрагми тільки в осьовому напрямку (вздовж зазору).

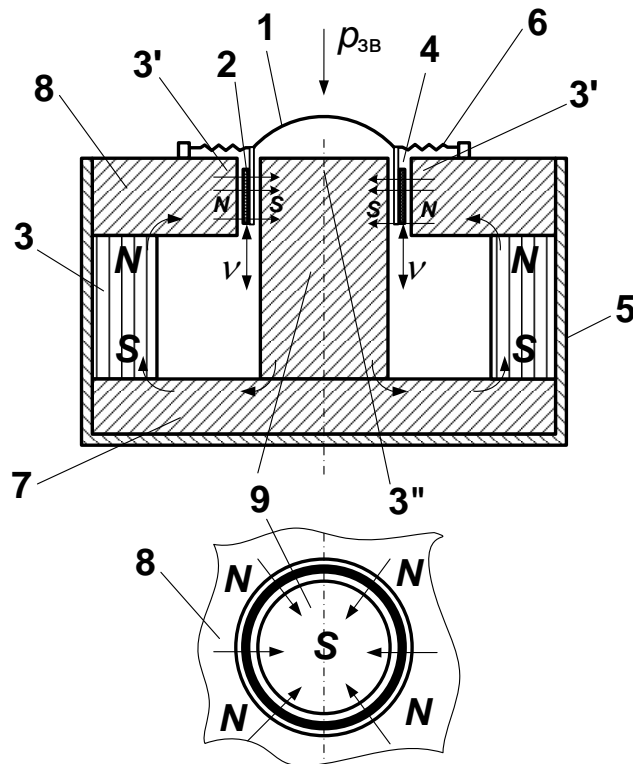


Рисунок 2.12 - Конструкція електродинамічного катушкового мікрофона

- 1 - діафрагма (мембрана),
- 2 - катушка,
- 3 - кільцевий магніт, (**3'** - полюсний наконечник *N*-полярності магніту, **3''** - полюсний наконечник *S*-полярності магніту),
- 4 - повітряний зазор магнітної системи, в якому знаходиться катушка,
- 5 - корпус мікрофона,
- 6 - гнучкий гофрований підвіс,
- 7 - нижній фланець, що виконує функцію магнітопроводу для *S*-полярності магніту,
- 8 - верхній фланець, що виконує роль полюсного наконечника для *N*-полярності магніту,

9 - kern, що виконує функцію полюсного наконечника S -полярності магніту (3'').

Електрична навантажувальна характеристика мікрофона $\frac{U}{\varepsilon} = \frac{R_H}{R_H + R_i}$

практично рівномірна у всьому частотному діапазоні, оскільки електричний опір котушки R_i майже не залежить від частоти (лише дещо підвищується на ВЧ через індуктивний характер котушки). Власний опір мікрофона можна записати як

$$Z_0 = R_k + j\omega L_k,$$

де R_k і L_k - активний опір і індуктивність котушки. $Z_0 \approx R_k$, так як кількість витків мала.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку $K = Bl$ - величина постійна.

Акустична характеристика для сигналів, довжина хвилі яких більше розмірів мікрофона, $a_{ak} = S$, де S - площа діафрагми.

Як приймач тиску, мікрофон має акустичну чутливість $\frac{F}{p} = (1..2)S$, яка

майже рівномірна (лише з невеликим підвищенням до ВЧ, на яких довжина хвилі стає порівнянна з розмірами мікрофона). Для більшості мікрофонів це настає на частотах близько 10 кГц.

Чутливість мікрофона визначають формулою

$$E_\theta = \frac{U}{p_{зв}} = a_{ak} a_{мех} a_{ел} = a_{ak} \frac{K}{z + K^2/(z_0 + z_{вн})} \cdot \frac{Z_H}{Z_0 + Z_{вн}} = a_{ak} \frac{Bl}{z + B^2 l^2/(z_0 + z_H)} \cdot \frac{Z_H}{Z_0 + Z_H}.$$

Для узгодженого навантаження чутливість можна записати

$$E_\theta = \frac{1}{2} \cdot \frac{BlS}{z_0 + B^2 l^2/(2R_k)}.$$

Звідси випливає, що частотна характеристика чутливості залежить тільки від власного механічного опору мікрофона z_0 . Тому основним завданням при конструюванні мікрофона є забезпечення сталості його механічного опору в робочій смузі частот. На рис. 2.13, а (крива 1) наведено частотну характеристику мікрофона без корекції. З наведеної частотної характеристики чутливості видно, що вона має велику нерівномірність, причому має дуже високу резонансну частоту через послідовне з'єднання c_1 і c_0 (див. рис. 2.14, c_1 - гнучкість гофрованого підвісу, c_0 - гнучкість об'єму повітря під діафрагмою).

Слід зазначити, що даний мікрофон має малу чутливість через те, що діафрагмі доводиться долати не тільки жорсткість підвісу, а й жорсткість малого об'єму повітря під діафрагмою.

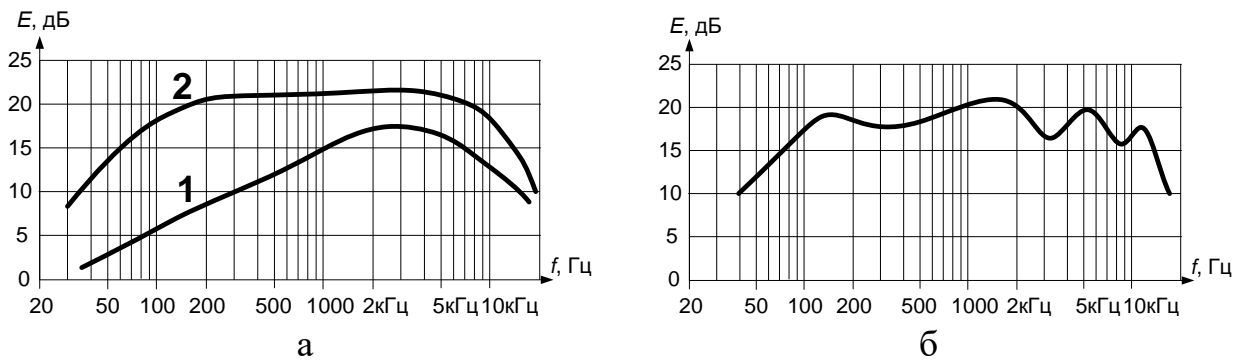
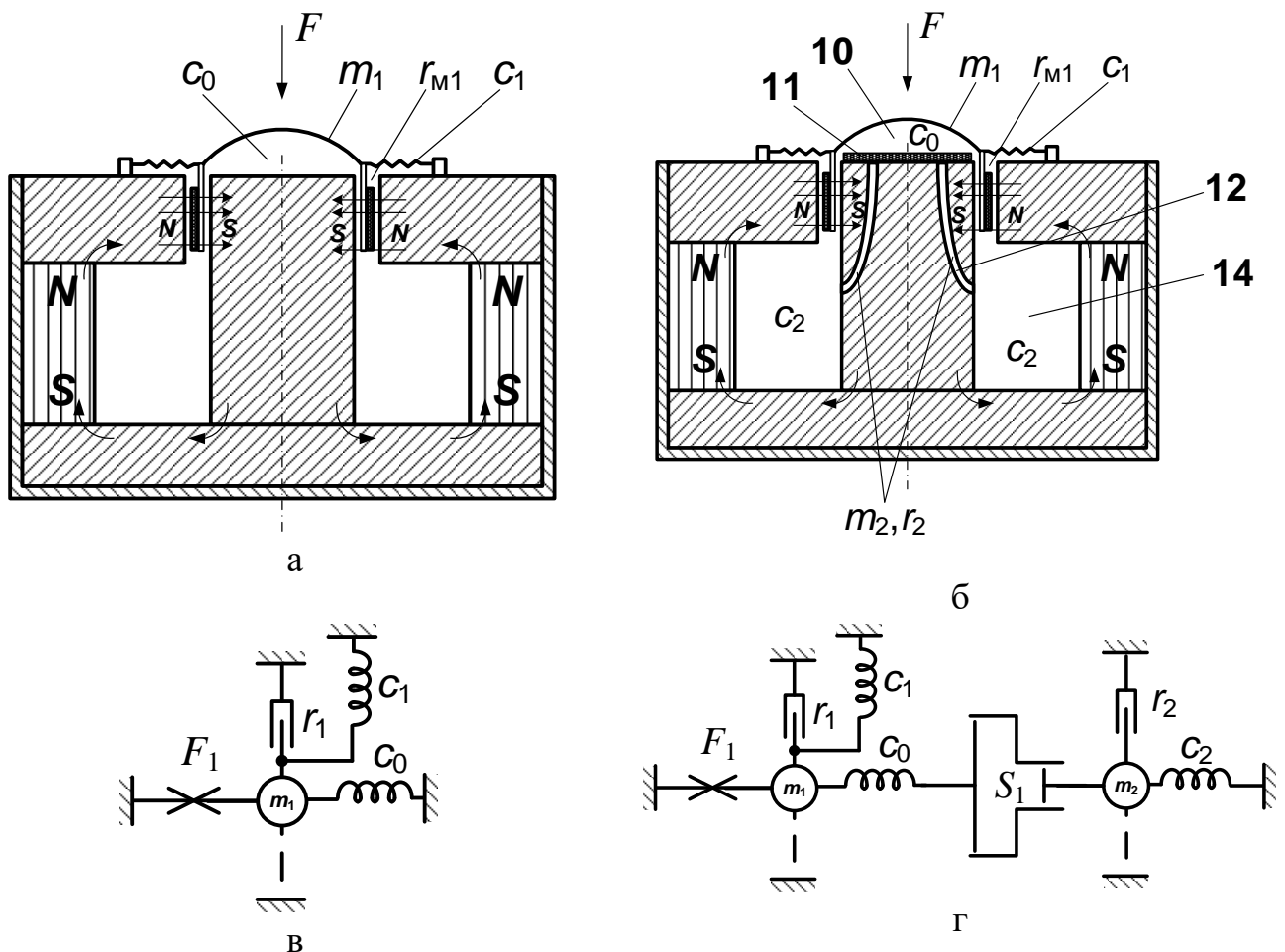


Рисунок 2.13 - Частотний діапазон мікрофона

Для отримання рівномірної наскрізної частотної характеристики мікрофона необхідно, щоб механічна характеристика $\frac{v}{F} = \frac{1}{z_{\text{мех}}}$, а значить, і механічний опір $z_{\text{мех}}$ рухомої системи не залежали від частоти.

Це можна здійснити тільки застосуванням складної механічної системи, що має ряд резонансів в передаваному частотному діапазоні. Найбільш поширена система з двох механоакустичних резонаторів. Для цього у керні робляться вузькі канали **12**, через які об'єм під діафрагмою з'єднується з об'ємом всередині магніту (див. рис. 2.14, б). Канали **12** і об'єм всередині магніту являють собою резонатор Гельмгольца, параметрами якого є маса повітря m_2 , що залежить від розмірів і числа каналів, активний опір втрат в каналах r_{m2} і гнучкість c_2 об'єму повітря всередині магніту.



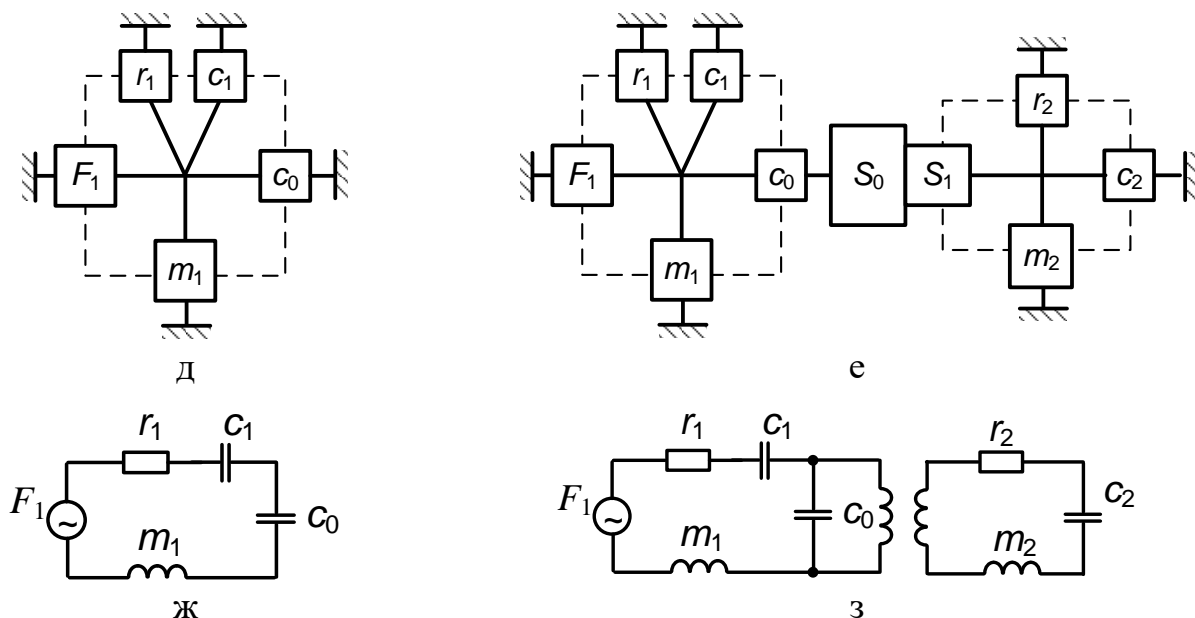


Рисунок 2.14 - Конструкція електродинамічного котушкового мікрофона без (а) і з (б) механічною корекцією з урахуванням механічних властивостей та приклад побудови схеми електричного аналога (в-з)

r_{m1} - тертя котушки об повітря в зазорі і молекулярне тертя в гофрованому підвісі;
 r_{m2} - тертя повітряних потоків в каналах і шовку **11**;
 m_1 - маса діафрагми разом з масою котушки і підвісу;
 m_2 - маса повітря в каналах;
 c_1 - гнучкість гофрованого підвісу;
 c_0 - гнучкість об'єму повітря під діафрагмою;
 c_2 - гнучкість об'єму повітря всередині магніту між полюсними наконечниками.

Таким чином крім резонансу рухомої системи, що утворена з її маси m_1 , гнучкості підвісу c_1 , гнучкості повітря в об'ємі **10** під діафрагмою c_0 і тертя котушки об повітря r_{m1} (при коливанні її в зазорі виходить досить значне тертя), створюється друга резонансна система, що утворена масою повітря m_2 в каналах **12**, тертям r_{m2} в каналах і шовку **11** і гнучкістю повітря c_2 в об'ємі **14** між магнітом і керном.

Згідно правилами з'єднання аналогів механічних елементів складемо аналогову електричну схему. Конденсатори c_1 і c_0 повинні бути з'єднані послідовно. Канали **12** і об'єм **14** являють собою резонатор Гельмгольца r_{m2} , m_2 , c_2 . Цей резонатор з'єднаний в механічній схемі послідовно з об'ємом c_0 , тому в аналоговій схемі їх з'єднано паралельно.

Схему електричного аналога мікрофона наведено на рис. 2.14, а в перетвореному вигляді з параметрами резонатора Гельмгольца r_{m2} , m_2 , c_2 , перерахованими через коефіцієнт трансформації, - на рис. 2.15.

Еквівалентна електрична схема (рис. 2.15, а) являє собою Т-подібну ланку смугового фільтра, що навантажено на активний опір r_{m2} , а r_{m1} є внутрішнім опором джерела (рис. 2.15, б). При відповідному виборі співвідношень між параметрами фільтра його частотна характеристика буде рівномірною в

діапазоні частот від резонансної частоти рухомої системи $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{m_1 c_1}}$ до частоти

$$\omega_2 = \omega_1 \sqrt{1 + 2\left(\frac{c_1 + c_2}{c_0}\right)}.$$

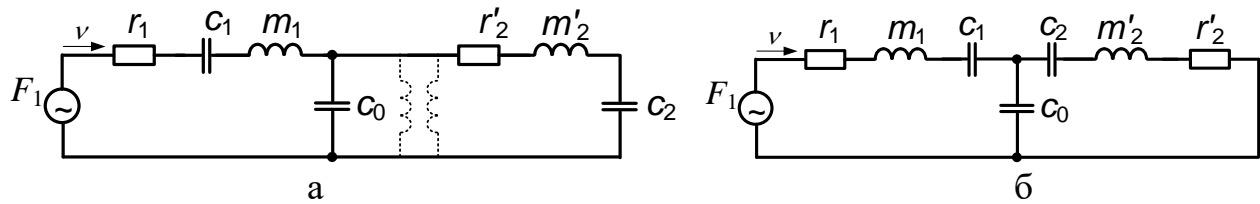


Рисунок 2.15 - Схеми механічної системи динамічного мікрофона з параметрами, перерахованими через коефіцієнт трансформації:
а) електричний аналог; б) та ж схема, перетворена в Т-подібну форму

Спад частотної характеристики в області нижніх частот визначають параметри рухомої системи мікрофона і він міг бути б зменшений збільшенням маси і гнучкості рухомої системи. Однак з ціллю підвищення чутливості маса рухомої системи обирається настільки малою, наскільки це допускається конструктивними можливостями. Прагнення ж зробити мікрофон досить стійким до струсів перешкоджає збільшенню гнучкості кріплення рухомої системи в тій мірі, в якій це необхідно для розширення діапазону частот. Дійсно, це призвело б до дуже значної піддатливості підвісу, і випадкові поштовхи могли б спричинити за собою перекося котушки в зазорі.

Тому нижня межа рівномірної частотної характеристики мікрофона лежить не нижче 300 Гц.

Щоб зменшити цю границю, вводять додаткові коригувальні елементи. Два варіанти такої корекції наведено на рис. 2.16. Варіантом такої спеціальної механічної корекції в мікрофонах може бути додатковий резонатор, розміщений в керні магнітного кола мікрофона з резонансною частотою, в кілька разів меншою нижньої межі рівномірної характеристики ω_1 . Це дає можливість отримати рівномірну частотну характеристику динамічного мікрофона в межах від 100 Гц до 8000 Гц.

Згідно з одним варіантом, в центральному стрижні магніту робиться наскрізний канал **15** (рис. 2.16) з акустичною масою m_3 повітря, що знаходиться в ньому. Канал виходить в додатковий повітряний об'єм **16** за магнітом з гнучкістю c_3 . Цей додатковий резонатор настраюють на частоту ω_{1-1} нижче нижньої граничної частоти фільтру ω_1 з таким розрахунком, щоб розширити частотну характеристику в області нижніх частот при припустимій її нерівномірності.

Для забезпечення необхідної широкої смуги частот часто роблять кілька резонаторів, розподіляючи їх резонансні частоти в області нижче ω_1 для того, щоб отримати більш рівномірну частотну характеристику.

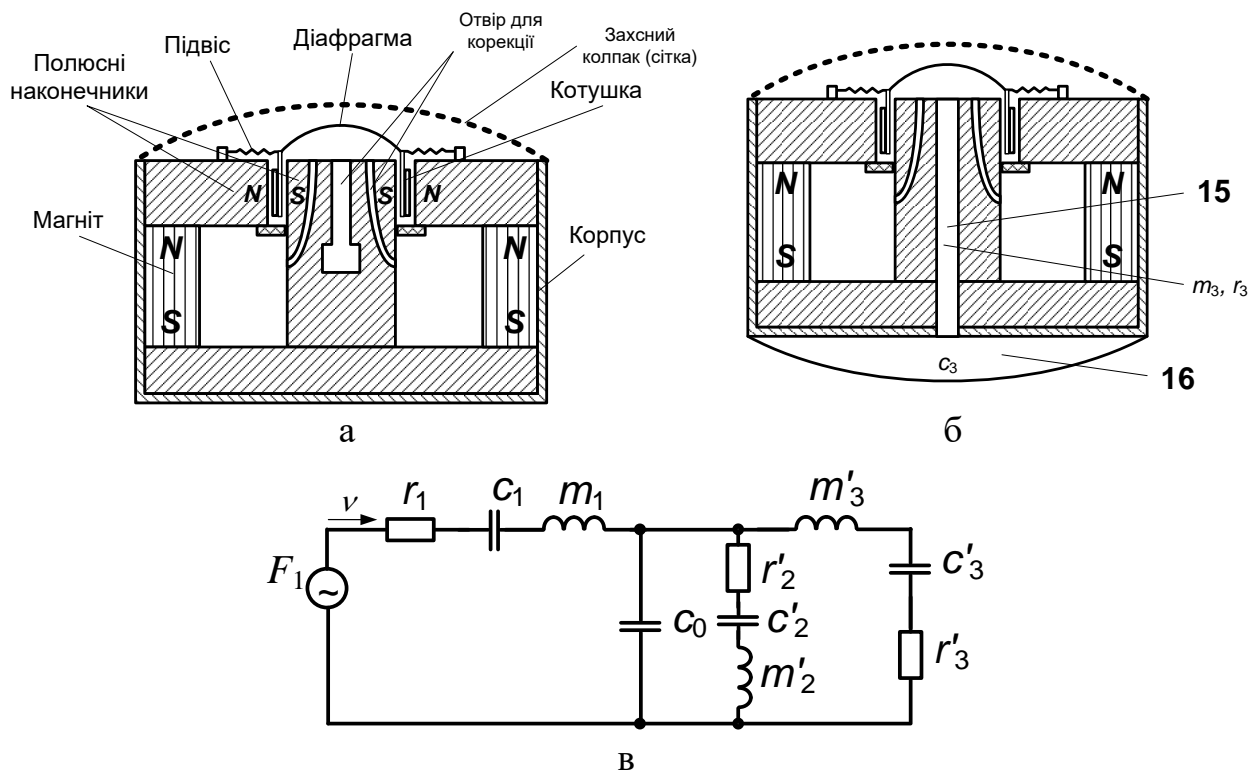


Рисунок 2.16 - Варіанти механічної корекції для вирівнювання частотної характеристики мікрофона (а, б), в - електричний аналог котушкового мікрофона з додатковою НЧ корекцією

Якщо застосувати додаткові корекції на найнижчих частотах і на частотах близько 10 кГц, то частотний діапазон мікрофона буде розширено до 50...10 000 Гц. Частотну характеристику мікрофона з додатковою корекцією наведено на рис. 2.13, а (крива 2).

Для окремих типів мікрофонів при ретельній корекції і підборі їх параметрів можна ще вище підняти верхню межу (до 15 кГц), але це дуже ускладнює процес доопрацювання мікрофона у виробництві. До того ж нерівномірність частотної характеристики виходить досить значною навіть в основній смузі частот (6...8 дБ), а в усьому частотному діапазоні вона доходить до 15...20 дБ. Реальну частотну характеристику динамічного мікрофона з корекцією наведено на рис. 2.13, б.

Стандартний рівень чутливості динамічних мікрофонів знаходиться близько -58 дБ. Спрямованість проявляється тільки на частотах вище 5000 Гц. Застосовують ці мікрофони в основному для передачі мови. Для музичних передач використовують тільки широкосмугові мікрофони (від 50 Гц до 15 000 Гц). Динамічні мікрофони мають досить хорошу механічну міцність, зручні і можуть працювати в найрізноманітніших умовах, як в приміщеннях, так і на відкритому повітрі, тому вони отримали широке поширення.

В цілому електродинамічні котушкові мікрофони мають такі основні переваги: надійність конструкції, достатньо широкий діапазон частот, відсутність джерела живлення, можливість роботи з достатньо довгими мікрофонними кабелями. Однак, незважаючи на конструктивно складну систему корекції, котушкові мікрофони мають порівняно велику нерівномірністю частотної характеристики (до 12 дБ в робочому діапазоні частот, рис. 2.13, б).

Асиметричний динамічний приймач градієнта тиску. Такий мікрофон відрізняється за конструкцією від динамічного мікрофона-приймача тиску тим, що в його корпусі і в магнітному колі є отвори. Завдяки їм звукові хвилі проходять шляхом: отвір, внутрішній об'єм, канали, до зворотної сторони діафрагми, з відповідною різницею ходу відносно звукових хвиль, що приходять до лицьової сторони діафрагми. При цьому різницю ходу визначає відстань отворів від краю діафрагми.

На відміну від приймача тиску, акустична характеристика такого мікрофона пропорційна частоті, тому для нього необхідно, щоб механічна характеристика була оберненою, а механічний опір прямо пропорційний частоті. А це буде за умови, якщо резонансна частота рухомої системи буде якнайменшою. На частотах вище резонансної механічний опір $Z_{\text{мех}}$ буде визначено масою рухомої системи $Z_{\text{мех}} \approx \omega m$, а нижня межа переданого частотного діапазону буде близька до резонансної частоти рухомої системи ω_0 .

Характеристика спрямованості такого мікрофона матиме форму кардіоїди, якщо довжини внутрішньої і зовнішньої ділянок ходу звукової хвилі будуть однаковими при $\theta = 180^\circ$.

В мікрофонах, що випускає промисловість, характеристика спрямованості для середньої частини частотного діапазону близька до суперкардіоїдної, для якої перепад чутливості і індекс фронт-тил буде близько 10...12 дБ. Частотна характеристика такого мікрофона для фронтального і тильного прийому має діапазон частот 50...15000 Гц. Рівень чутливості -54 дБ, нерівномірність частотної характеристики 10 дБ.

Мікрофон застосовують як в студіях, так і для звукопідсилення в театрах і концертних залах, тобто за наявності акустичних шумів, створюваних публікою.

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ СТРІЧКОВИЙ МІКРОФОН

Іншим видом електродинамічного мікрофона є ***стрічковий*** мікрофон. Принцип його дії мало чим відрізняється від принципу дії котушкового мікрофона, проте конструкція *стрічкового електродинамічного мікрофона* дещо відрізняється від котушкового (рис. 2.17).

Тут магнітну систему складено з постійного магніту **3** підковоподібної форми і полюсних наконечників **3'** і **3''**, між якими натягнута легка, зазвичай, алюмінієва тонка (близько 2 мкм) стрічка **1**, що слугує діафрагмою (приймач звукового акустичного сигналу). Стрічку розміщують в повітряному проміжку **4** паралельно силовим лініям магнітного поля. Сам мікрофон розташовують відносно джерела звуку так, щоб сила, яку створює акустична хвиля, була спрямована перпендикулярно до площини стрічки. В разі дії на обидві її сторони звукового тиску стрічка починає коливатися в магнітному зазорі в напрямку, перпендикулярному полю, утвореному полюсними наконечниками, перетинаючи при цьому магнітні силові лінії, внаслідок чого на її кінцях індукується напруга.

Стрічковий мікрофон є ***симетричним приймачем градієнта тиску***.

У полюсних наконечниках зроблено ряд отворів (вікон) **5** для того, щоб зменшити різницю ходу звукових хвиль, що діють на стрічку з обох її сторін, і в той же час уникнути насичення магнітного кола. Відстань між отворами разом з стрічкою (**2а**) не перевищує 1,7 см, тобто не перевищує довжини хвилі, що відповідає частоті 20 кГц. Це забезпечує вільне огинання звукових хвиль у

всьому діапазоні переданих частот і лінійність акустичної чутливості мікрофона в діапазоні до 15 кГц.

Стрічка, укріплена на ізоляційних планках 2, має довжину від 5 до 10 см. Індукція в зазорі не перевищує 1,0 Т, тому ЕРС, що розвивається стрічкою, складає кілька мікрівольт. Для підвищення напруги на виході мікрофон оснащено трансформатором (Т) з великим коефіцієнтом трансформації (що сягає 50 і більше). Зауважимо, що опір стрічки малий і навіть за такого коефіцієнта трансформації внутрішній опір мікрофона R_i виходить не вище 200...250 Ом. Внаслідок малості опору стрічки трансформатор розташовують якомога ближче до неї, щоб опір з'єднувальних проводів був значно менше опору стрічки.

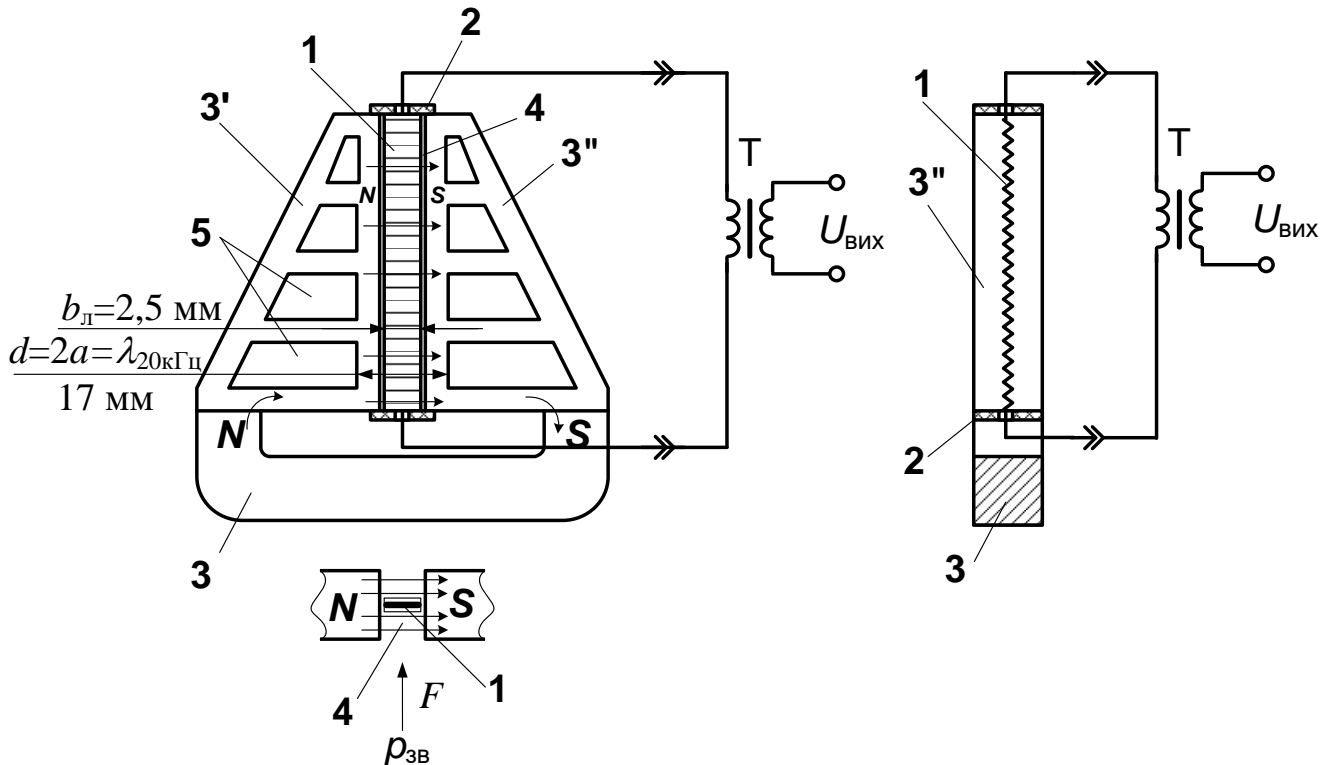


Рисунок 2.17 - Конструкція електродинамічного стрічкового мікрофона

- 1 - діафрагма у вигляді гофрованої стрічки,
- 2 - ізоляційна планка,
- 3 - підковоподібний магніт, (3' - полюсний наконечник N-полярності магніту, 3'' - полюсний наконечник S-полярності магніту),
- 4 - повітряний зазор магнітної системи, в якому розташовано діафрагму,
- Т - підвищувальний трансформатор.

Електричну характеристику цього мікрофона за навантаження R_n і коефіцієнта трансформації n , визначають формулою $\frac{U}{\varepsilon} = \frac{nR_n}{R_n + R_i}$, і вона не залежить від частоти.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку $K = Bl$, як і у динамічного котушкового мікрофона, є постійним значенням.

Акустична чутливість стрічкового мікрофона як приймача градієнта тиску для віддаленої зони, пропорційна частоті

$$\frac{F}{p} = S \frac{\omega a \cos \theta}{c} \cos \psi,$$

де a - половина ширини діафрагми з умовним екраном; S - площа діафрагми; c - швидкість звуку; ω - кругова частота; θ - кут падіння хвилі по відношенню до осі мікрофона; ψ - зсув фаз між тиском і швидкістю коливань. (Для ближньої зони дії (ближче 0,5 м від джерела звуку) стрічкові мікрофони не застосовують, так як в цьому випадку вони будуть підкреслювати низькі частоти)

Щоб наскрізна частотна характеристика мікрофона була рівномірною, необхідна її корекція: механічна система повинна мати характеристику, обернено пропорційну частоті, $\frac{v}{F} = \frac{1}{z_{\text{мех}}} = \frac{K}{\omega}$, тобто механічний опір рухомої системи повинен бути пропорційний частоті.

Це можливо за умови, якщо резонанс рухомої системи буде на частотах нижче найнижчої частоти переданого діапазону, тобто $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{mc_{\text{м}}}} \leq \omega_{\text{мін}}$.

При цьому механічний опір $z_{\text{м}} \approx \omega m$, так як активний механічний опір через його малість впливатиме тільки на резонансній частоті.

Таким чином, осьову чутливість мікрофона визначають таким відношенням:

$$E_{\text{ос}} = \frac{U}{p_{\text{зв}}} = n \frac{2a\omega Bl}{2c\omega m} = \frac{naBl}{cm} = \frac{naBlS}{c} \omega_0 c_{\text{м}},$$

де S - площа стрічки.

З нього випливає, що для підвищення чутливості мікрофона необхідно збільшити площу стрічки і індукцію в щілині, зменшувати масу стрічки. Ці умови суперечливі. На заданій резонансній частоті стрічки (її, зазвичай, беруть близько 30 Гц) необхідно збільшувати гнучкість стрічки. Це забезпечують шляхом її гофрування і можливого зменшення її товщини (до двох мікрон).

Чутливість стрічкового мікрофона градієнта тиску також можна записати як

$$E_{\theta} = \frac{\omega S d}{c_{\text{зв}}} \cos \theta \cdot \frac{Bl}{z_0 + B^2 l^2 / (z_0 + z_{\text{н}})} \cdot \frac{Z_{\text{н}}}{Z_0 + Z_{\text{н}}}.$$

З формули випливає, що чутливість мікрофона пропорційна частоті. Щоб наскрізна частотна характеристика була рівномірною, механічна система повинна мати характеристику, обернено пропорційну частоті.

Власний опір механічної системи

$$z_0 = j\omega m + \frac{1}{j\omega c} = j\omega m \left(1 - \frac{1}{\omega^2 mc}\right).$$

Електричним опором стрічки, з огляду на його дуже мале значення, можна знехтувати. Тоді, для узгодженого підключення маємо (припускаємо, що коефіцієнт трансформації трансформатора дорівнює 1)

$$E_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega S d}{c_{\text{зв}}} \cos \theta \cdot \frac{Bl}{j\omega m \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) + \frac{B^2 l^2}{2R_i}}.$$

Для того, щоб чутливість мікрофона не залежала від частоти, необхідно виконати дві умови:

$$\omega \gg \omega_0 \quad \text{та} \quad \frac{B^2 l^2}{2R_i} \ll \omega m.$$

Для виконання першої умови збільшують гнучкість підвісу гофруванням стрічки. Реально $\omega_0/2\pi$ знижують до 10...15 Гц.

Збільшувати масу стрічки для зниження ω_0 не вигідно, так як при цьому зменшується чутливість.

Друга умова легко виконується на середніх і високих частотах, де значення ωm велике. На нижніх частотах задають припустимий спад частотної характеристики і, виходячи з цього, вибирають величину індукції в зазорі.

Стрічка є найбільш вразливим місцем цього мікрофона: від сильного подиху (наприклад, від вітру) вона рветься. Тому стрічковий мікрофон використовують тільки в приміщенні.

Електродинамічні мікрофони мають ряд переваг: стійкість до перевантажень, стабільність роботи в різних кліматичних умовах, міцність конструкції тощо.

Стандартний рівень чутливості стрічкового мікрофона (наприклад, МЛ-51) такий же, як і у динамічного котушкового (-57 дБ), частотний діапазон лежить в межах від 50 Гц до 16 000 Гц і має нерівномірність частотної характеристики не більше 8 дБ (найбільш рівномірна вона в діапазоні нижче 5 кГц).

Характеристика спрямованості його - косинусоїда («вісімка») і не залежить від частоти. У цьому перевага стрічкового мікрофона градієнта тиску.

Можна зустріти стрічковий мікрофон і у вигляді комбінації приймача тиску і приймача градієнта тиску (**комбінований приймач**). Частина стрічки з тильного боку захищена від дії звукових хвиль камерою з лабіринтом. Таким чином виходить, що одна частина стрічки знаходиться під дією різниці тиску хвиль, що приходять з фронтальної і тильної сторін, а інша частина - тільки під дією хвиль, що приходять з фронтальної сторони. Напруги від обох частин стрічки додають арифметично. Характеристика спрямованості такого мікрофона матиме форму кардіоїди, якщо стрічка розділена навпіл. Якщо ж у приймачі тиску довжина стрічки буде менше, ніж у приймача градієнта тиску, то можна отримати суперкардіоїдну або гіперкардіоїдну характеристику спрямованості. Відповідний такий конструкції мікрофон має обмежений низу частотний діапазон (70...15000 Гц) і підвищену нерівномірність частотної характеристики (10 дБ). Його використовують в приміщеннях, як для передавання музики, так і для передавання мови.

Крім таких мікрофонів, випускаються комбіновані, що об'єднують котушковий мікрофон-приймач тиску і стрічковий мікрофон-приймач градієнта тиску, які розташовано один над іншим. Можна підключати обидва мікрофона або один з них і отримувати три види характеристики спрямованості.

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИЙ (КОНДЕНСАТОРНИЙ) МІКРОФОН

У електроакустичних трактах високої якості найбільше застосування отримав конденсаторний мікрофон.

Конструктивно конденсаторний мікрофон (рис. 2.18) виконано у вигляді плоского конденсатора, який складено з двох обкладинок (електродів). Обкладки розташовано на малій відстані одна від одної.

Один з електродів конденсатора масивний **2**, а другий є тонкою жорстко натягнутою мембраною **1**, що виконує функцію діафрагми мікрофона. Діафрагма металізована зсередини і скріплена через діелектричне кільце **3** з жорстким електродом.

На конденсатор подано напругу поляризації U_0 через високоомний опір R_H . Тобто конденсатор підключено в електричне коло послідовно з джерелом постійного струму U_0 і активним опором навантаження R_H .

Мембрана **1** під впливом звукового тиску може коливатися відносно нерухомого електрода **2**. При коливаннях мембрани ємність конденсатора C_K змінюється, зростаючи при їх зближенні і зменшуючись при віддаленні. А оскільки заряд $q \equiv C_K U_0$ залишається постійним (конденсатор не встигає перезаряджатися через велику сталу часу $R_H C_0 = \tau$), то змінюється напруга на конденсаторі, а на опорі навантаження виникає падіння напруги. Ця додаткова напруга $\Delta U = \varepsilon$ і є ЕРС на виході мікрофона, що виникла в результаті дії на мембрану звукового тиску.

При цьому, щоб в мікрофоні не виникали нелінійні спотворення, необхідно виконувати умову $U_0 \gg U_{\approx}$.

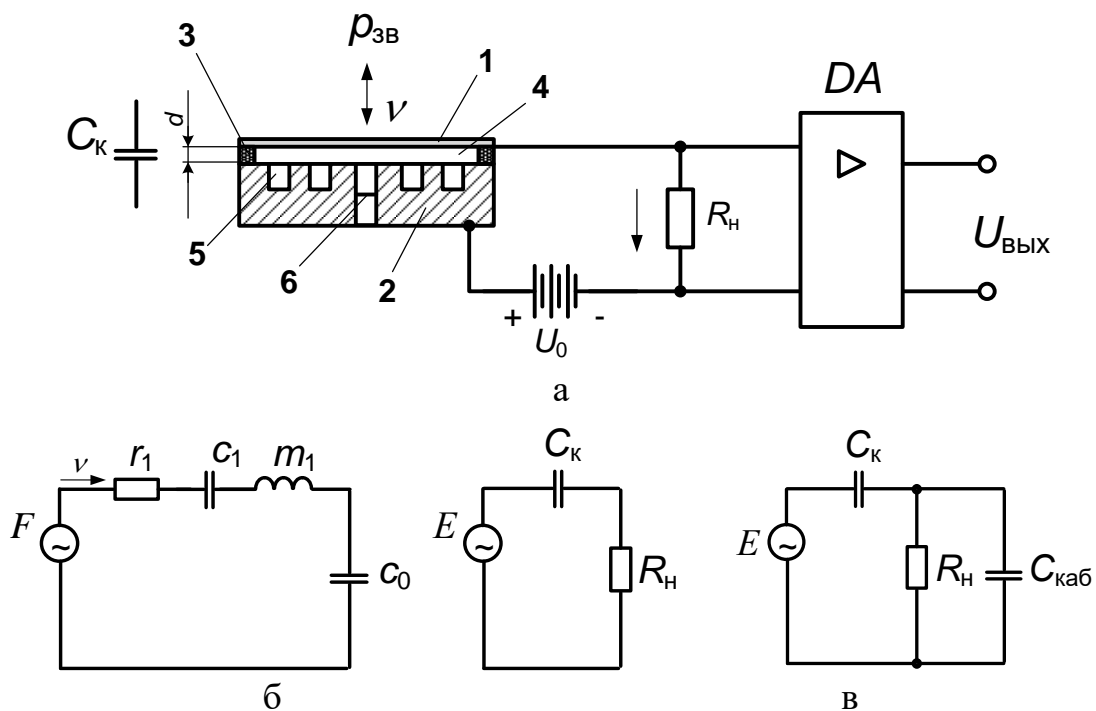


Рисунок 2.18 - Конструкція електростатичного (конденсаторного) мікрофона (а) і його еквівалентна схема (б), в з урахуванням утворення ємнісного дільника при підключенні кабелю

1 - діафрагма, рухомий електрод конденсатора,

- 2 - нерухомий масивний електрод конденсатора,
- 3 - ізоляційне кільце,
- 4 - повітряний зазор між обкладинками конденсатора,
- 5 - канавка для демпфування,
- 6 - канал і гумова плівка для вирівнювання атмосферного тиску,
- U_0 - напруга поляризації,
- DA - підсилювач напруги.

Діафрагму діаметром 6...25 мм виконують з полістиролу, покритого з внутрішньої сторони золотом або металевим сплавом. Відстань між обкладинками прагнуть зробити якомога меншою, але її обмежено явищем пробою, небезпека якого виникає через відносно велику напругу поляризації ($U_0 = 48$ В); зазвичай вона дорівнює 20...40 мкм. Сталу напругу подають на обкладинки сигнальним кабелем (тому таке живлення називають «фантомним»). Реальний капсуль конденсаторного мікрофона має дуже складну конструкцію: з особливою формою нерухомого електрода, з використанням додаткових акустичних порожнин, іноді із застосуванням двох діафрагм і тощо.

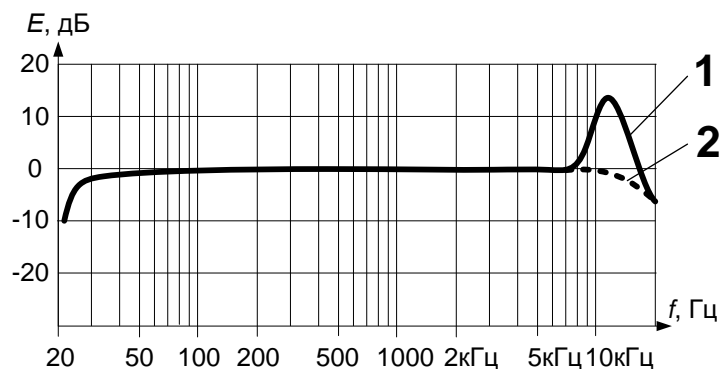


Рисунок 2.19 - Частотна характеристика конденсаторного мікрофона:
1 - без демпфірування; 2 - з демпфуванням

У електретному мікрофоні, на відміну від конденсаторного, напруга поляризації утворена попередньою електризацією одного з електродів, який виготовляють з полімерів або керамічних матеріалів, що поляризують, здатних зберігати цей заряд тривалий час. Такий електрод має металеве покриття, яке, по суті, і є електродом конденсатора, а електрет служить лише джерелом напруги поляризації. Поляризація електрета поступово зменшується і через кілька років буде потрібна або його заміна, або повторна поляризація. У цьому недолік електретного мікрофона порівняно з конденсаторним, а перевага - для нього не потрібно джерело напруги. За механічними, акустичними характеристикам, а також за конструкцією електретний мікрофон нічим не відрізняється від конденсаторного.

Приймач тиску.

Для цього приймача акустична чутливість майже не залежить від частоти, тобто, $\frac{F}{p} = (1...2)S$, де S - ефективна поверхня мембрани.

Щоб нерівномірність електричної характеристики була незначною, необхідно виконати умову $R_n \geq \frac{1}{\omega_n C_0}$, де ω_n - нижня межа переданого частотного діапазону. А оскільки ємність конденсатора C_0 становить 100...200 пФ, то для нижньої межі $f_n = 30$ Гц необхідно мати опір навантаження $R_n \geq 50$ МОм.

Оскільки вхідний опір підсилювача $R_{вх}$ має бути в 10...20 разів більше опору навантаження, він становитиме приблизно тисячі мегаом. При таких високих вхідних опорах виникає відносно високий рівень власних шумів мікрофона. Це один недоліків конденсаторного і електретного мікрофонів. Але оскільки шуми виникають переважно в області низьких частот, то це трохи спрощує застосування цих мікрофонів, так як на цих частотах музичні і мовні сигнали мають досить високі рівні.

Якщо відстань d між електродами конденсатора змінюється, то відповідно змінюється ємність C_0 : $\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta d}{d}$. Зміна ємності викликає зміну напруги на конденсаторі $\frac{\Delta U}{U_0} = -\frac{\Delta C}{C_0}$. Абсолютна зміна напруги є ЕРС еквівалентного генератора, а зміна відстані між електродами в середньому дорівнює зміщенню мембрани, тобто $\Delta U = \varepsilon$ і $\Delta d = x$, тому $\frac{\varepsilon}{U_0} = \frac{x}{d}$. Але так як для синусоїдного процесу $x = x_m e^{j\omega x}$ або $v = \frac{dx}{dt} = j\omega x$, то коефіцієнт електромеханічного зв'язку $K = \frac{\varepsilon}{v} = \frac{U_0}{j\omega d}$.

Для отримання рівномірної частотної характеристики мікрофона необхідна взаємна корекція коефіцієнта електромеханічного зв'язку і механічної характеристики $\frac{v}{F} = \frac{1}{z_m}$.

Отже, механічний опір рухомої системи мікрофона має бути обернено пропорційний частоті. Це можливо, коли

$$\omega m < \frac{1}{\omega c_m}$$

або

$$\omega < \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m c_m}},$$

де m - маса мембрани; $1/c_m$ - пружність системи, що складається з пружності мембрани і пружності повітря в об'ємі під нею.

Таким чином, компенсація характеристик забезпечена, якщо основна резонансна частота рухомої системи - мембрани буде вище найвищої частоти переданого діапазону, тобто для $\omega_0 > \omega_b$. Тому мембрана повинна бути сильно натягнута.

Чутливість мікрофона можливо визначати виразом

$$E_{oc} = \frac{U}{p_{зв}} = \frac{SU_0 c_M}{d} = \frac{SU_0}{\omega_0 m d},$$

так як $z_M \approx \frac{1}{\omega_0 c_M}$.

Власний механічний опір мікрофона

$$z_0 = r_1 + j\omega m_1 + \frac{1}{j\omega c_\Sigma},$$

де $c_\Sigma = \frac{c_1 c_0}{c_1 + c_0}$ - гнучкість рухомої системи мікрофонного капсуля, c_0 - гнучкість об'єму повітря під мембраною; c_1 - гнучкість мембрани.

Враховуючи конструктивні особливості мембрани, її активним опором можна знехтувати. Тоді

$$z_0 = j\omega m_1 + \frac{1}{j\omega c_\Sigma} = \frac{1}{j\omega c_\Sigma} (1 - \omega^2 m_1 c_\Sigma) = \frac{1}{j\omega c_\Sigma} (1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}),$$

де $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m_1 c_\Sigma}}$.

Власний електричний опір мікрофона носить ємнісний характер і може бути визначено

як $Z_0 = \frac{1}{j\omega C_K}$.

Акустична характеристика $a_{ак} = S$ для мікрофону-приймача тиску.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку $K = \frac{\varepsilon}{\nu} = \frac{U_0}{j\omega d}$.

Тому механічна характеристика

$$a_{мех} = \frac{k}{z_0 + z_{вн}} \approx \frac{U_0}{j\omega d z_0}.$$

Величиною внесеного опору $z_{вн}$ нехтують. Звідси формула чутливості конденсаторного мікрофона

$$E_\theta = S \frac{U_0}{j\omega d (1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})} \frac{1}{j\omega c_\Sigma} \cdot \frac{R_H}{R_H + \frac{1}{j\omega c_\Sigma}} = \frac{SU_0 c_\Sigma}{d (1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})} \cdot \frac{R_H}{R_H + \frac{1}{j\omega c_\Sigma}}.$$

Як видно, чутливість конденсаторного мікрофона залежить від частоти, причому характер залежності визначено параметрами механічної системою (ω_0) і електричного кола.

Для того, щоб чутливість не залежала від частоти, необхідно виконати дві умови:

$$\omega_0 > \omega_H \quad \text{та} \quad R_H \gg \frac{1}{\omega_H C_K}$$

де ω_0 , ω_H - верхня і нижня частоти робочого діапазону мікрофона.

Для таких умов чутливість мікрофона не залежить від частоти:

$$E_\theta \approx \frac{SU_0 c_\Sigma}{d}.$$

Відношення напруги поляризації до відстані між електродами визначено

електричною міцністю повітря і тонкого шару діелектрика, що покриває електроди. В разі $\frac{U_0}{d} = 10^4$ В/мм конденсатор пробивається, тому для відстані, що дорівнює 20 мкм, напругу поляризації застосовують не більше 150 В.

При заданій резонансній частоті маса мембрани повинна бути якомога меншою. Виготовляють її звичайно з дюралюмінію або полімерної плівки (фторопласт, лавсан), покритої тонким шаром золота. Масу зменшують за рахунок товщини (5...20 мкм). Але при цьому дотримуються високої механічної міцності на розрив.

Щоб підвищити чутливість мікрофона, необхідно знизити резонансну частоту мембрани. Але щоб при цьому не створювати велику нерівномірність частотної характеристики, необхідно ввести загасання в коливальну механічну систему. Для цього в нерухомому електроді роблять канавки **5** з гострими кутами (рис. 2.18). Об'єм повітря в цих канавках, складаючись з об'ємом повітряного шару під мембраною, збільшує гнучкість, причому, тим більше, чим глибше канавки. При коливаннях мембрани повітря під нею протискується уздовж радіусів електродів, в результаті чого утворюються завихрення, що вносять суттєві втрати в механічну коливальну систему. Ці втрати підбирають так, щоб частотна характеристика була близька до рівномірної (рис. 2.19, крива 2). Зазвичай частоту резонансу в цих умовах беруть удвічі нижче верхньої межі переданого частотного діапазону.

Разом з тим ємність мікрофона визначено розмірами плоскої частини поверхні нерухомого електрода і не залежить від глибини канавки. Таким чином вдається приблизно в 10 разів без істотного зменшення ємності збільшити об'єм і чутливість мікрофона приблизно на 20 дБ.

У деяких мікрофонах для збільшення демпфування в нерухомому електроді роблять додатково ряд дуже вузьких отворів. Проходження повітря через них супроводжується значним тертям.

Для того щоб при зміні атмосферного тиску мембрана не зазнавала випинання або вдавлення, в нерухомому електроді роблять отвір **6**, що з'єднує об'єм під мембраною з зовнішнім повітрям.

Частотна характеристика конденсаторного мікрофона відрізняється своєю рівномірністю. У діапазоні до резонансу мембрани нерівномірність може бути забезпечено дуже малою, вище резонансу вона дещо збільшується. Внаслідок малої нерівномірності характеристики конденсаторні мікрофони часто використовують як вимірювальні.

За своїми параметрами якості конденсаторні мікрофони є одними з кращих. Вони мають рівну горизонтальну частотну характеристику чутливості в широкій смузі частот. Правда, їх виготовлення технологічно складно. Конденсаторні мікрофони-приймачі тиску широко використовують в техніці акустичних вимірювань.

Мікрофони для передавання музики мають діапазон частот від 20 Гц до 20000 Гц з нерівномірністю частотної характеристики в діапазоні 50...15000 Гц не вище 6 дБ. Стандартний рівень чутливості конденсаторних мікрофонів з підсилювачем становить -54 дБ (в мікрофонах для звукозапису рівень чутливості

становить -30...-40 дБ), середній індекс фронт/тил для простого кардіоїдного варіанту 12...16 дБ, рівень власного шуму для мікрофонів високого класу становить 0...10 дБ, для мікрофонів середнього класу – 15...18 дБ, що вище, ніж у динамічних мікрофонів.

Діаграма спрямованості відхиляється від кола тільки на найвищих частотах переданого діапазону.

Вимірювальні мікрофони виготовляють на діапазон частот від 20...30 Гц до 30...40 кГц з нерівномірністю 1 дБ до частоти 10 кГц і не більше 6 дБ - вище 10 кГц. Розміри капсуля такого мікрофона беруть в межах 6...15 мм, через це він практично неспрямований до частоти 20...40 кГц. Чутливість його не перевищує -60 дБ.

Електретні мікрофони випускають поки тільки для побутових магнітофонів. Частотний діапазон їх становить 50...15000 Гц, нерівномірність частотної характеристики 10...15 дБ, рівень власного шуму 27...38 дБ. Через високий рівень шумів вони непридатні для мовних систем.

Конденсаторні мікрофони мають ряд переваг, які дозволяють їх широко використовувати в студійній практиці. До числа основних з них можна віднести такі:

- низький рівень перехідних спотворень (через малу масу діафрагми),
- широкий частотний діапазон,
- мала чутливість до магнітних завад тощо.

Однак вони мають меншу механічну і кліматичну стійкість, ніж динамічні мікрофони, вимагають додаткової напруги поляризації і мають більш високу вартість.

Недолік конденсаторних мікрофонів - необхідність розміщення перших каскадів мікрофонного підсилювача біля самого капсуля. Раніше це дуже збільшувало розміри мікрофона. З появою польових транзисторів це не викликає особливих конструктивних труднощів.

Справа в тому, що з'єднання капсуля з підсилювачем за допомогою кабелю різко знижує чутливість мікрофона. Сказане пояснює рис. 2.18,в, який ілюструє, що при підключенні кабелю утворюється ємнісний дільник C_k і $C_{каб}$.

Так, якщо взяти кабель довжиною 10 м з погонною ємністю 100 пФ/м, то при $C_k = 100$ пФ отримаємо дільник 1:10. Активний опір навантаження не враховуємо через його велику величину. Навіть на нижній робочій частоті

$$R_n > \frac{1}{\omega_n C_{каб}},$$

де $C_{каб}$ - ємність кабелю.

Слід зауважити, що конденсаторні мікрофони можуть бути виконані конструктивно як приймачі тиску, так і як приймачі градієнта тиску, а також як комбіновані приймачі (рис.2.20). Мембрана мікрофона- приймача градієнта тиску може бути розташована між двома нерухомими перфорованими електродами 2-1 і 2-2 (рис.2.20, а).

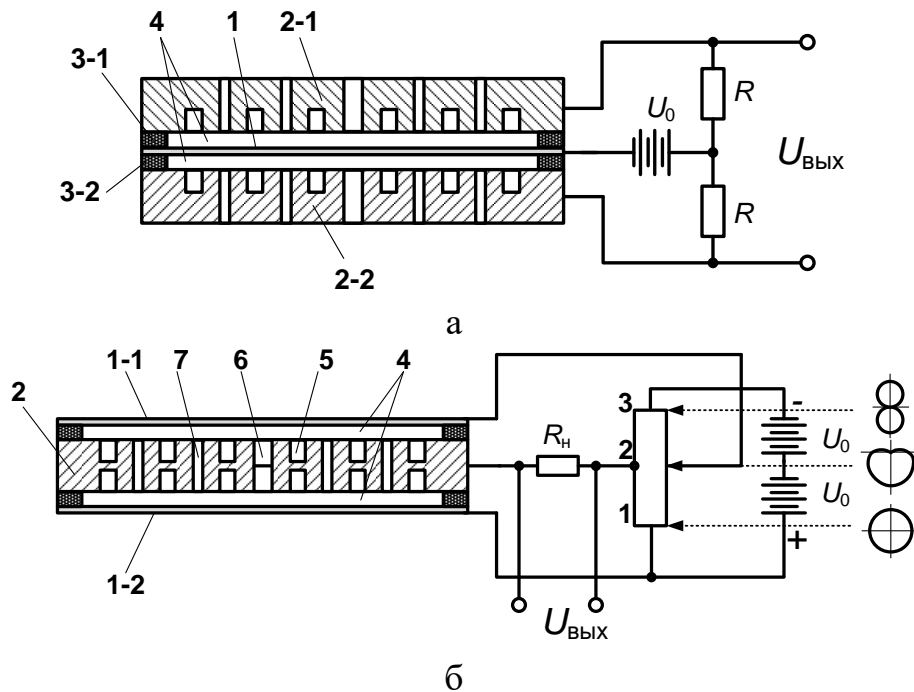


Рисунок 2.20 - Конструкція електростатичного (конденсаторного) мікрофона-приймача градієнта тиску (а) і комбінованого приймача з діаграмою спрямованості, яку можна регулювати (б)

- 1 - мембрани; 2 - масивний електрод; 3 - ізоляційні прокладки;
 4 - повітряний зазор між електродами; 5 - канавки для демпфування;
 6 - канал і гумова плівка для вирівнювання атмосферного тиску;
 7 - канали для передачі звукового тиску внутрішньої сторони мембрани.

Комбіновані приймачі

Розглянемо кілька прикладів електричного комбінування мікрофонів для отримання різних діаграм спрямованості.

Нехай комбінований мікрофон складений з двох однакових мікрофонів з кардіоїдними характеристиками спрямованості, осі яких спрямовані в протилежні сторони (рис. 2.21). Оскільки робочі осі мікрофонів розгорнуті на 180° , то залежність вихідної напруги одного з них від кута падіння хвилі θ можна описати співвідношенням

$$u_1 = U_0 \frac{(1 + \cos \theta)}{2},$$

а іншого

$$u_2 = U_0 \frac{1 + (\cos \theta + 180^\circ)}{2}.$$

Таким чином, для суми напруг маємо

$$u = u_1 + u_2 = U_0 \frac{2 + \cos \theta + (\cos \theta + 180^\circ)}{2} = U_0 \frac{2 + 2 \cos \theta + 180^\circ}{2},$$

а для різниці

$$u = u_1 - u_2 = U_0 \cos \theta.$$

При додаванні вихідних напруг система стає неспрямованою, а при відніманні - набуває двосторонню спрямованість (рис. 2.21, д).

При відключенні першого або другого мікрофону або відніманні їх напруг при їх нерівності можливо отримати ряд проміжних діаграм спрямованості. Деякі з них представлені на рис. 2.21, е, ж. Розгорнувши в такій же системі осі мікрофонів не на 180° , а на 90° , можна, змінивши співвідношення напруг u_1 і u_2 , здійснити поворот максимуму чутливості в межах кута 90° . Отримання комбінованих характеристик не обов'язково пов'язане з використанням окремих базових мікрофонів: поєднання різних властивостей може бути реалізовано в акустико-механічній системі одного і того ж мікрофона.

Найбільш поширеними конденсаторними мікрофонами є мікрофони, комбіновані з двох несиметричних приймачів градієнта тиску (рис. 2.20, б).

У такому мікрофоні середній електрод **2** масивний, металевий, а два зовнішніх електрода **1-1** і **1-2** виготовляють з тонкої, міцної полімерної плівки з золотим покриттям. Обидві плівки натягнуті до можливої межі. У нерухомому електроді зроблені як канавки для демпфування **5**, так і наскрізні канали **7**. Крім того, в корпусі є невеликий отвір **6**, який затягнутий гнучкою плівкою і призначений для вирівнювання атмосферного тиску.

Звуковий тиск, що діє на зовнішню сторону будь-якої з мембран, передається через канали в нерухомому електроді до внутрішній стороні другої мембрани. Тому на кожну з мембран діє звуковий тиск із зовнішньої сторони, а через канали - з внутрішньої. Між звуковими тисками є зсув за фазою, обумовлений різницею ходу звукових хвиль, яку, в свою чергу, визначає товщина капсули мікрофону.

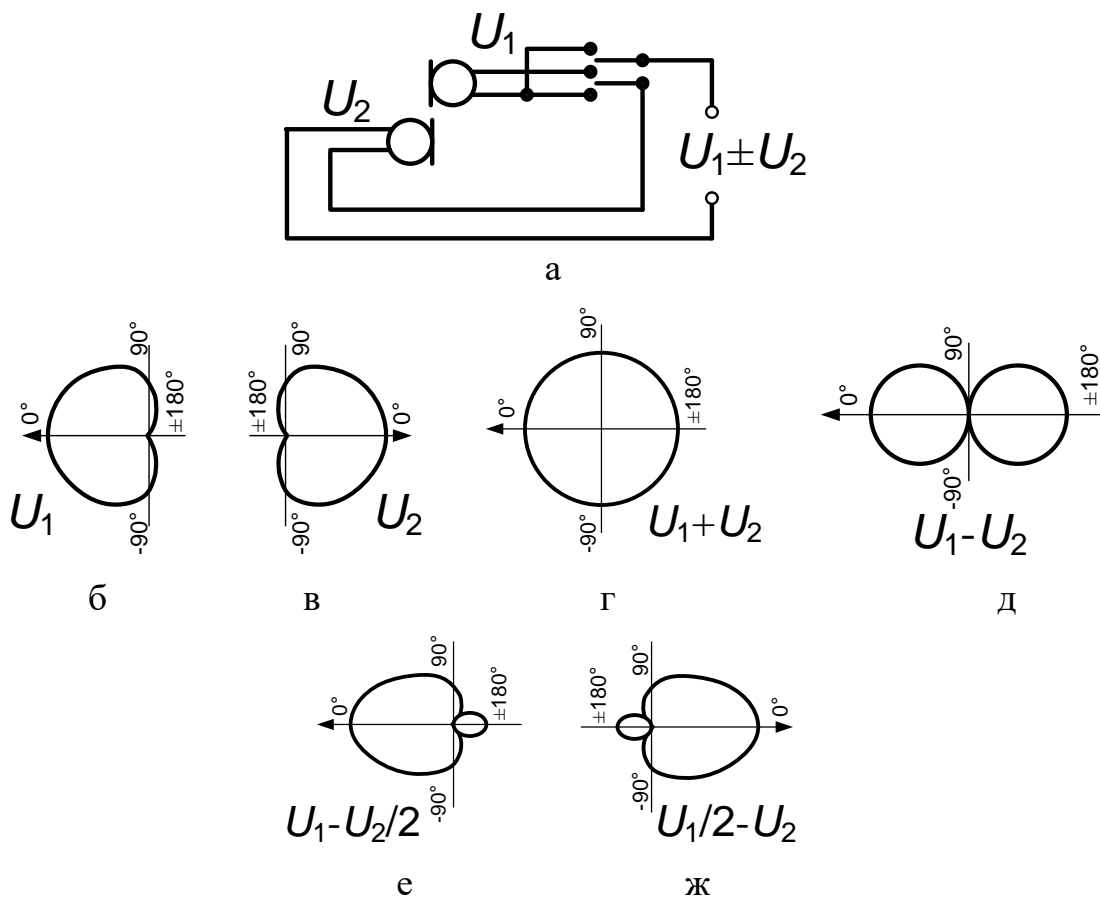


Рисунок 2.21 - Конструкція електрично комбінованого мікрофона і варіанти характеристик його спрямованості

В одному варіанті напругу поляризації підключено між нерухомим і одним з рухомих електродів мікрофона - мембраною. Друга мембрана в цьому випадку виконує функцію тільки передавача коливань ззовні до внутрішньої сторони робочої мембрани. В цьому випадку мікрофон має кардіоїдну характеристики спрямованості.

Якщо подати напругу поляризації ще й між другою мембраною і нерухомим електродом, то отримаємо два мікрофони, кожен з кардіоїдною характеристикою.

З двох кардіоїдних можна отримати кругову характеристику, якщо включити виходи мікрофонів у фазі:

$$U(1 + \cos \theta) + U(1 - \cos \theta) = 2U,$$

або косинусоїдну («вісімку»), якщо з'єднати їх у протифазі:

$$U(1 + \cos \theta) - U(1 - \cos \theta) = 2U \cos \theta.$$

Таким чином, простим перемиканням можна отримати три типи характеристики спрямованості.

Використання двомембранного капсуля дозволяє дистанційно керувати ДС мікрофона (рис. 2.20, б). Напругу поляризації подають на потенціометр, який є регулятором спрямованості. Нерухомий електрод підключають через резистор R до середнього виводу потенціометра. Ліва мембрана постійно з'єднана з позитивним полюсом джерела живлення. Праву мембрана може бути підключено до потенціометра в його різних точках.

Підключення до точки **1** відповідає подачі на праву мембрану позитивної полярності джерела живлення, тобто синфазного включення мембран (протилежних мікрофонів), що визначатиме характеристику спрямованості ненаправленого мікрофона.

Підключення до точки **3** відповідає подачі на праву мембрану негативної полярності джерела живлення, тобто протифазного включення мембран, що буде визначати характеристику спрямованості двостороннє спрямованого мікрофона.

У положенні **2** права мембрана отримує той же електричний потенціал, що і нерухомий електрод, тому вона не буде електрично активною, що відповідає мікрофону з кардіоїдною характеристикою.

РАДІОМІКРОФОНИ

Однією з найгостріших проблем при роботі з мікрофонами була їх «прив'язка» до апаратури - провід надавав і надає чимало незручностей і навіть неприємностей артистам, журналістам, відео- і звукооператорам і звукорежисерам. Тому поява радіомікрофонів стала дуже важливим технічним рішенням для всієї звукової індустрії. В даний час існує кілька типів радіомікрофонних систем, що розрізняються за конструкцією і особливостям передавання радіосигналу.

Найбільшого поширення мають радіомікрофони, в яких передавач і антена інтегровані в корпус «ручного» мікрофона. Основне застосування - концертне (вокал, мова).

Театральнo-концертне застосування мають також системи з головними мікрофонами, передавач яких може кріпитися на ремені або розташовуватися в кишені виконавця, залишаючи вільними руки і надаючи тим самим максимум свободи.

Об'єднує концертні та вокальні системи можливість розташування мікрофона в безпосередній близькості біля рота виконавця. Це є абсолютно необхідною умовою

запобігання самозбудження системи звукопідсилення при наявності на сцені системи моніторів і досить високих рівнях звукового тиску в залі.

Інший різновид концертних радіомікрофонів - інструментальні, коли мікрофон кріпиться на інструменті (саксофон, труба) або в електроінструмент, його підключають до лінійного входу передавача (електрогітара).

Ще один різновид мікрофонних систем - петличні, головне застосування яких - презентації, телебачення, ток-шоу, відеозйомка тощо. Розташовують такі мікрофони на лацканах або комірці одягу, для чого в комплекті є, як правило, кнопки і защіпки. Розміри цих мікрофонів намагаються робити якомога меншими, щоб вони були менш помітні. Передавач, як у головних і інструментальних радіомікрофонах, кріплять на реміні або в кишені.

Необхідно відзначити, що, як правило, всі кишенькові передавачі мають універсальні входи з можливістю перемикання чутливості, тобто їх можуть використовувати як з електроінструментами, так і з динамічними і конденсаторними мікрофонами з «фантомним» живленням від своєї батареї.

Переважає більшість радіомікрофонів використовують в радіоканалі метод частотної модуляції. Простіші радіомікрофони використовують діапазон частот від 170 МГц до 220 МГц. У цьому діапазоні можливе використання до восьми одночасно працюючих систем. Дорогі системи високого класу використовують більш високі частоти, аж до 1 ГГц (450...950 МГц). Технічна реалізація їх складніша, але кількість одночасно працюючих мікрофонів може досягати 15 і більше. Крім того, ці системи мають більшу завадозахищеність. У ряді систем є можливість вибору робочої частоти (радіоканалу), а деякі радіомікрофони можуть навіть аналізувати ефір на предмет зайнятості і автоматично визначати оптимальні частоти передавання.

Потужність передавача в більшості систем становить 50 мВт. При такій потужності дистанція впевненого прийому становить 100...150 м.

Прості радіомікрофони мають, як правило, одну антену. Однак в даному діапазоні частот радіохвилі, відбиваючись від різних об'єктів, стін тощо, утворюють складну інтерференційну картину, в зв'язку з чим можлива поява «мертвих зон» прийому. Тому, незважаючи на велику складність, а значить і ціну, більшою популярністю користуються двоантенні системи, вільні від цього недоліку. Принцип їх дії полягає в тому, що якщо одна антена знаходиться в «мертвій зоні», то друга, рознесена з нею в просторі, забезпечить впевнений прийом.

ЛАРИНГОФОНИ

Ларингофони, тобто гортанні мікрофони, призначені для прийому мовлення через коливання тканин ший, розташованих поблизу гортані. В цьому випадку сприймаються не акустичні хвилі, а механічні коливання стінок мовного тракту, викликані акустичними коливаннями при проголошенні звуків.

Всі існуючі ларингофони засновані на інерційному принципі дії. Капсуль ларингофона встановлений в закритий корпус, який розташовано на передній стороні ший біля стінок гортані. Зазвичай, застосовують два послідовно підключених ларингофонних капсуля, розташованих по обидві сторони гортані.

Електромагнітний ларингофон (рис. 2.22, а) замість діафрагми має плоску прямокутну пластинку **1**, закріплену в середній точці на корпусі **2** і прикріплену до магнітної системи з обох кінців в точках **8**.

Магнітна система складається з двох плоских магнітів **4**, одного фланця **5**, керна **6** і самої пластинки **1**. Між зрізом керна і пластинкою є невеликий повітряний зазор **7**. На керні знаходиться котушка **3**.

Механічна система має масу (магнітне коло і котушка) і гнучкість (гнучкість пластинки). Сила прикладена до цієї гнучкості. Електричний аналог

схеми являє собою контур з індуктивності і ємності, з'єднаних паралельно (рис. 2.22, в). Механічні коливання стінок гортані приводять у рух корпус ларингофона. За інерцією маса коливається в протилежній фазі, тому зазор змінюється в такт механічним коливанням гортані. Зміна зазору тягне за собою зміну магнітного потоку. В результаті в котушці індукується ЕРС.

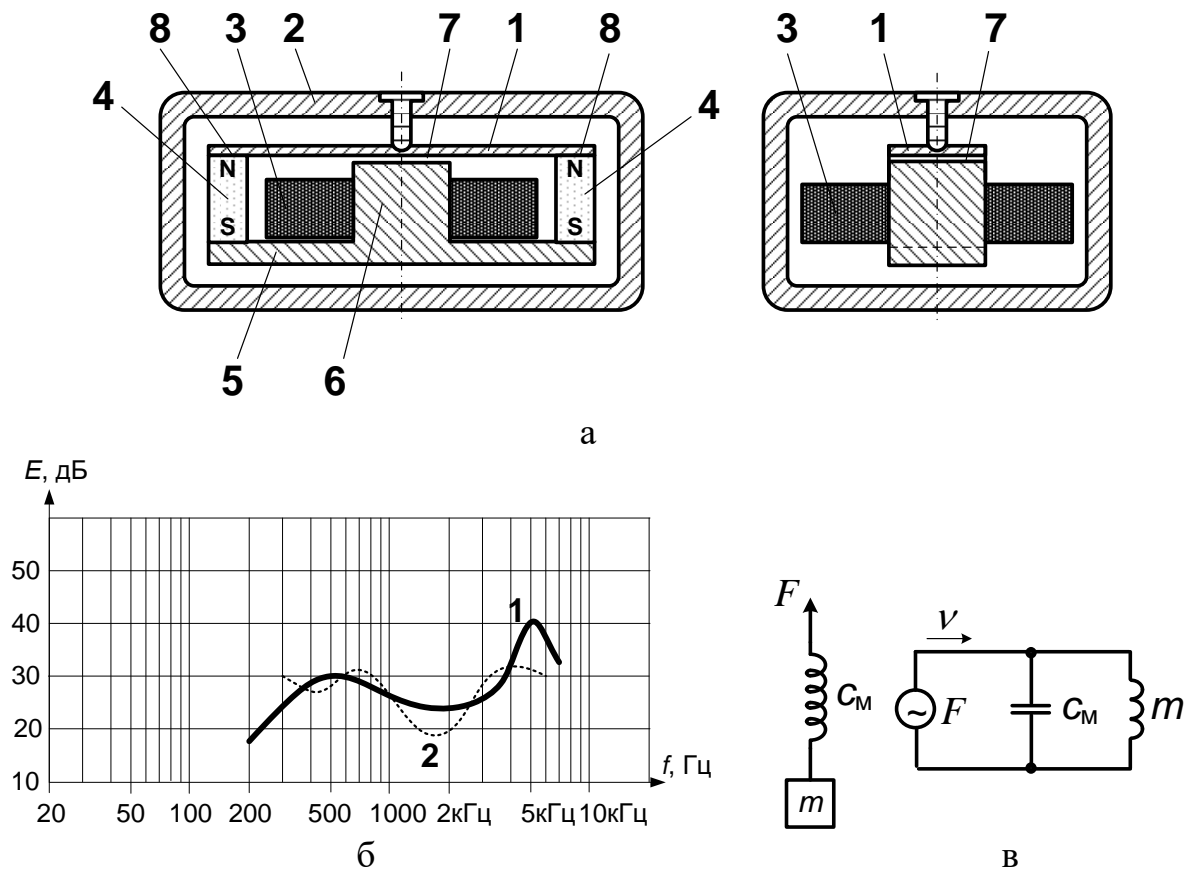


Рисунок 2.22 - Електромагнітний ларингофон

а) конструкція; б) частотна характеристика чутливості ларингофона, що наведена щодо звичайного мікрофона, який знаходиться на відстані 2,5 см від рота (суцільна крива) і шумостійкості (пунктир);

1 - діафрагма (планка); 2 - корпус; 3 - котушка; 4 - магніти; 5 - фланець; 6 - керн;
7 - повітряний зазор; 8 - місце спаювання планки з магнітами.

Якщо врахувати, що швидкість коливань стінок гортані в разі розмови зменшується обернено пропорційно квадрату частоти, то необхідно, щоб напруга, що розвивається ларингофоном за сталості швидкості коливань, збільшувалася з підвищенням частоти за квадратичним законом. Цього можна домогтися, якщо вибрати резонансну частоту механічної системи вище передаваного діапазону частот. У цьому випадку частотна характеристика чутливості ларингофона, приведена щодо чутливості еквівалентного мікрофона, буде досить рівномірною. Такий ларингофон повинен добре передавати всі форманти звуків мови. Насправді високочастотні звуки передаються погано, особливо шумові, так як їх рівень в коливаннях гортані порівняний з рівнями шумів, що виникають в тканинах тіла через життєдіяльності організму.

Ларингофони мають приблизно таку ж чутливість, як і електромагнітні мікрофони. Нерівномірність їх частотної характеристики невелика. Частотний діапазон від 300 Гц до 3000 Гц. Вони мають високу шумозахищеність і можуть

працювати в умовах шумів до 130 дБ (рис. 2.22, б).

2.4 СПЕЦІАЛІЗОВАНІ МІКРОФОННІ СИСТЕМИ І КОМПЛЕКТИ

Стереомікрофони

Для запису і передавання стереофонічних і просторових звукових сигналів в наш час розробляють спеціальні мікрофонні системи.

Безпосередньо стереоефект визначають двома факторами: різницею у часі приходу сигналу до лівого і правого вуха і різницею інтенсивностей бінауральної пари сигналів.

Більшість мікрофонних стереосистем можна розділити на наступні групи:

- роздільні стереосистеми (AB, DIN stereo, NOS stereo, ORTF stereo, Baffled stereo);
- поєднані стереосистеми (XY stereo, MS stereo, Blumlein stereo);
- «верхні» стереосистеми (Overhead microphones);
- системи типу «штучної голови» (Head related stereo, Sphere stereo, Stereo 180);
- бінауральні стереосистеми (Binaural stereo);
- системи для просторового звучання Surround Sound (Soundfield, SPL array і ін.);
- системи з адаптивним цифровим управлінням (Audio-Technica AT 895, Microtech Gefell KEM 970 тощо).

Роздільні мікрофонні стереосистеми

АВ-система: при записі за такою системою по фронту перед виконавцями встановлюють два або кілька підключених на один канал однакових за чутливістю і спрямованістю мікрофона на деякій відстані один від одного, так, щоб кожний канал міг працювати на свою зону. Акустичні осі мікрофонів можуть бути паралельними або розгорнутими. Мікрофони можуть бути як неспрямованими, так і спрямованими (наприклад, дві кардіоїди або дві вісімки). Загальну схему запису наведено на рис. 2.23, а. Сигнали з виходів мікрофонів окремими каналами надходять до двох гучномовців, розташованих праворуч і ліворуч щодо слухача.

Досягнення стереофонічного ефекту забезпечено тим, що звук, який приймає ближній до джерела звуку мікрофон, має більш високий рівень і випереджає за часом той же звук, який приймає інший мікрофон. Це співвідношення рівнів і часових зсувів збережено і в звуках, відтворюваних відповідними гучномовцями для слухачів, які перебувають в так званій зоні стереоефекту. Вона розташована уздовж осі симетрії гучномовців і поступово розширюється в міру віддалення від них. В разі переміщення джерела звуку між мікрофонами змінюються рівні і часові зсуви звуків, що сприймають мікрофони. Відповідно змінюються умови відтворення звуків в приміщенні для прослуховування. На слух це буде сприйматися як переміщення удаваного джерела звуку між гучномовцями.

Оскільки основний вплив на локалізацію джерела при такому записі надає зсув за часом між різними джерелами, то таку систему називають «часовою стереофонією», хоча, якщо застосувати спрямовані мікрофони, то можна отримати і різницю за інтенсивністю, що зробить локалізацію більш виразною.

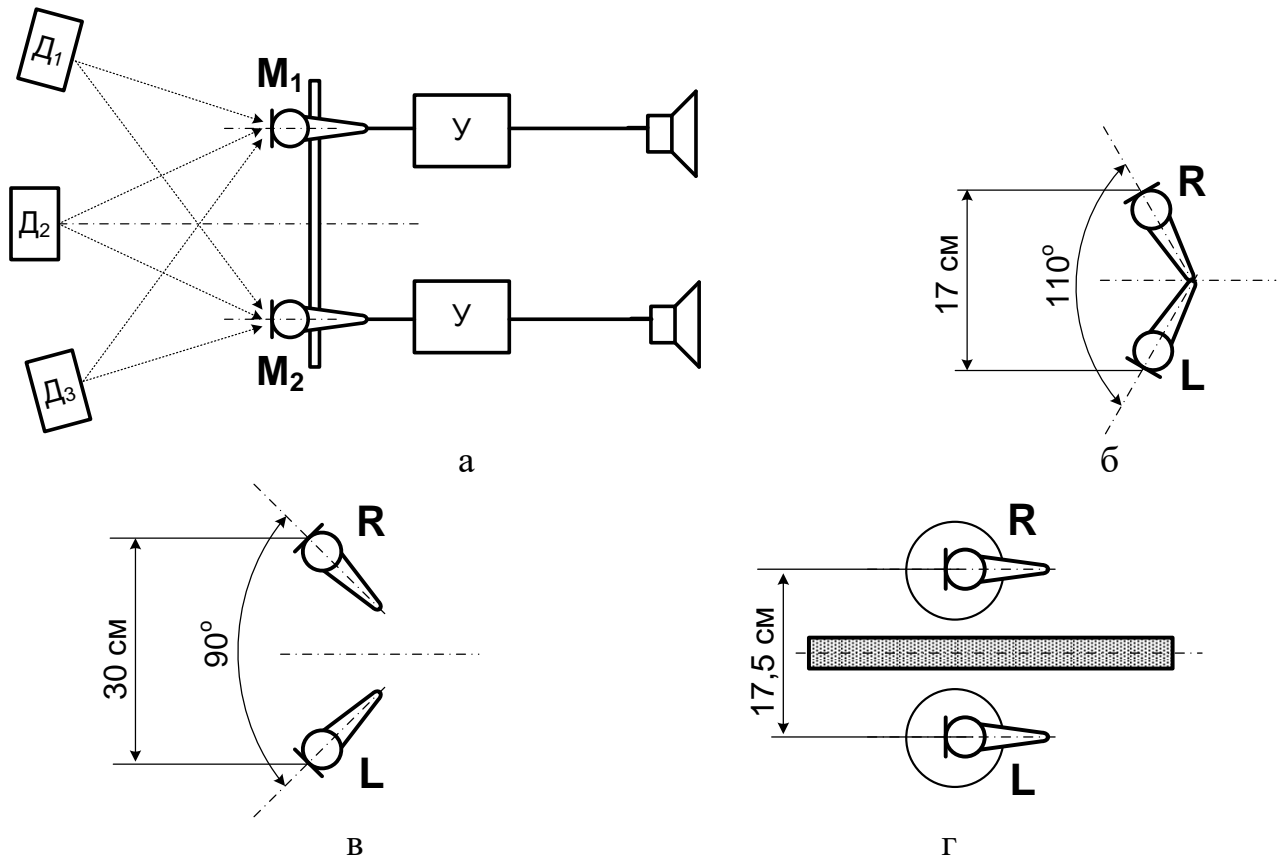


Рисунок 2.23 - Загальна схема запису по системі АВ (а),
ORTF stereo (б), NOS stereo (в), Baffled Stereo (г)
(M1, 2 - мікрофони. Д1, 2, 3 - джерела звуку)

Як показали експериментальні дослідження системи АВ, вона має певний недолік: в разі переміщення реального джерела звуку (наприклад, соліста) відповідне переміщення уявного джерела у вторинному приміщенні спостерігається в досить вузькій зоні.

Одним з основних недоліків системи АВ є неможливість задовольнити вимогу сумісності, яку технічно зведено до того, щоб сума лівого і правого сигналів стереопари давала б повноцінне монофонічне звучання. Але, як неважко бачити, при додаванні сигналів, що сприймаються мікрофонами А і В, неминучі частотні спотворення, пов'язані з різницею ходу звукових хвиль від джерела звуку до кожного з мікрофонів і, отже, з відповідними інтерференційними ефектами. Зауважимо, що різниця ходу може внести фазовий зсув в 180° , при цьому в монофонічному сигналі звук цієї частоти буде взагалі відсутнім.

Результати вимірювань показують, що для розширення цієї зони треба зменшити відношення Y/L , де Y - відстань від джерела до лінії встановлення мікрофонів, L - відстань між мікрофонами. Однак можливості таких змін обмежені, так як мікрофони не можна зсувати занадто близько (для збереження

стереоефекту), а наближення мікрофонів до солістів збільшує спотворення щодо глибини і призводить до підйому низьких частот у спрямованих мікрофонів.

Систему АВ використовують в основному для передавання відчуття простору, для точної локалізації окремих джерел вона менш корисна. Зазвичай, систему АВ використовують з додатковими мікрофонами.

DIN stereo (Deutsches Institut für Normung, німецьке радіомовлення) є різновидом системи АВ. Стереовідчуття створюють два кардіоїдних мікрофона, що розміщені під кутом 90° на відстані 20 см. Система створює часовий і інтенсивнісно-різницевий стереосигнал. Ця техніка корисна на близьких відстанях, вона забезпечує кут охоплення близько 115° .

ORTF stéréo technique (Office de Radiodiffusion Television France, французьке радіомовлення) використовує два кардіоїдних мікрофона, рознесених на 17 см під кутом 110° між капсулями (рис. 2.23, б). Розміщення мікрофонів відповідає відстані між вухами, а кут моделює тіньовий ефект людської голови. Ця техніка створює достатньо чітке стереовідчуття, забезпечує кут охоплення близько 95° і її широко застосовують на практиці.

NOS stereo (Nederlandse Omroep Stichting, датське радіомовлення) - ця система запису використовує два кардіоїдних мікрофона, що розміщені під кутом 90° на відстані 30 см один від одного (рис. 2.23, в). Стереовідчуття також створено завдяки комбінації інтенсивнісної і часової стереофонії. Ця техніка також корисна в основному на близьких відстанях для малих ансамблів (кут охоплення 80°).

Baffled Stereo - рознесена мікрофонна стереотехніка, що використовує акустичний напівпоглинальний екран. Екран розміщують між двома мікрофонами в рознесених стереосистемах типу АВ stereo, ORTF stéréo, DIN stereo або NOS. Поглинальний ефект екрану робить позитивний вплив на загасання звуку від джерел поза віссю і покращує роздільність між каналами. Одна з широко відомих екранованих стереосистем Jecklin Disc (за ім'ям її винахідника Ю. Джеклін) використовує два ненаправлені мікрофона, що розміщені на відстані 17,5 см, і спеціальний диск діаметром 36 см, розташований між ними (рис. 2.23, г).

Спроби знайти оптимальні співвідношення між відстанями та кутами встановлення мікрофонів тривають весь час. Узагальнивши результати таких робіт, М. Вільямс (M. Williams) побудовав номограму, що допомагає встановити залежність ефективного кута охоплення джерел під час запису (параметра кривих) від відстані і кута між мікрофонами.

Суміщені мікрофонні стереосистеми

Суміщені (поєднані) мікрофонні стереосистеми, в яких стереоефект формовано тільки завдяки різниці рівнів сигналів, розроблені, в першу чергу, для зменшення шумових ефектів. Мікрофони в таких системах повинні мати різні або по-різному орієнтовані діаграми спрямованості.

Ця техніка стереозапису передбачає використання двох спрямованих

мікрофонів, розташованих в одній точці. Ширина стереовідчуття залежить від форми характеристик спрямованості мікрофонів та способу їх встановлення. Найбільш відомі системи XY-stereo, MS-stereo і Blumlein stereo.

XY-stereo - в цій системі використовують два спрямованих мікрофона (дві кардіоїди або дві суперкардіоїди), що встановлено на одній осі, у яких акустичні осі розгорнуті і утворюють деякий кут (найчастіше ві 90° до 120° , хоча він може змінюватись і в межах від 0° до 180°). Мікрофони з'єднані каналами зв'язку з лівим і правим гучномовцями.

Приклад такої конструкції наведено на рис. 2.24, а, б. Оскільки обидва мікрофона розташовано в одному місці, то відмінності у часі приходу сигналів практично відсутні. Стерефонічний ефект виникає тут завдяки різниці інтенсивностей сигналів від джерела (так звана «інтенсивнісна» стереофонія), тобто внаслідок різної чутливості мікрофонів до звукових хвиль, що приходять від джерела звуку. Так, звучання інструменту, що знаходиться в напрямку осі X , буде сприйнято тільки одним мікрофоном, а інструменту, що розташований в напрямку осі Y - тільки іншим. І лише звучання інструменту, що знаходиться в середині сцени (на осі симетрії), буде сприйнято обома мікрофонами з рівною інтенсивністю. При розташуванні мікрофонів в одній точці зсув фаз між лівим і правим сигналами відсутній.

Система XY дає правильну відповідність уявного і реального джерела, якщо останній перебуває в певних кутових межах. Завдяки відсутності в сигналах лівого і правого каналів часових зсувів система XY має гарну сумісність з монофонічною системою. Однак в разі використання цієї системи також виникають спотворення просторової панорами (особливо за глибиною). У цій системі мають бути забезпечені жорсткі вимоги до гостроти характеристики спрямованості мікрофонів (інакше не вдається отримати різницю за інтенсивністю); крім того, у спрямованих мікрофонів проявляється «ефект близькості» при наближенні до джерела.

Для звукопередавання за способом XY можна використовувати мікрофони з характеристикою спрямованості у вигляді кардіоїди. Кут між головними осями діаграм спрямованості звукорежисер може змінювати. Система XY є більш сумісною з монофонічною, ніж система АВ, проте джерела звуку, розташовані в центрі мають підвищену гучність і в разі монофонічного відтворення здаються більш наближеними до слухача.

MS-стерео: вона також містить два суміщених мікрофона з відмінними характеристиками спрямованості, сигнали яких піддають сумарно-різницевому перетворенню. Зазвичай, використовують два суміщених мікрофона з діаграмами спрямованості типу «коло - вісімка» (рис. 2.24, б). Назву системи утворено першими літерами німецьких слів Mittel (середина) і Seite (сторона).

Напруга $U_{\text{мв}}$ на виході мікрофона M буде незмінною за будь-якого положення джерела, а напруга з мікрофона S визначена формою його характеристики спрямованості. Для положення джерела під кутом 90° вихідна напруга буде дорівнювати сумі напруг з мікрофонів M і S ; для положення джерела під кутом 0° вона дорівнюватиме лише напрузі з M -мікрофона, а для положення під кутом -90° - різниці напруг з M і S мікрофонів.

За допомогою сумарно-різницевого перетворення можна формувати сигнали в двох каналах передавання.

Система MS вимагає введення в схему додаткових вузлів: сумарно-різницевого перетворювачів, стереорегуляторів напрямку і бази, - але вона має і ряд переваг перед системою XY (дає можливість легко регулювати як загальну ширину бази, так і ширину окремих ділянок, зайнятих групами виконавців). Канал M формує повноцінний монофонічний сигнал, що забезпечує повну сумісність.

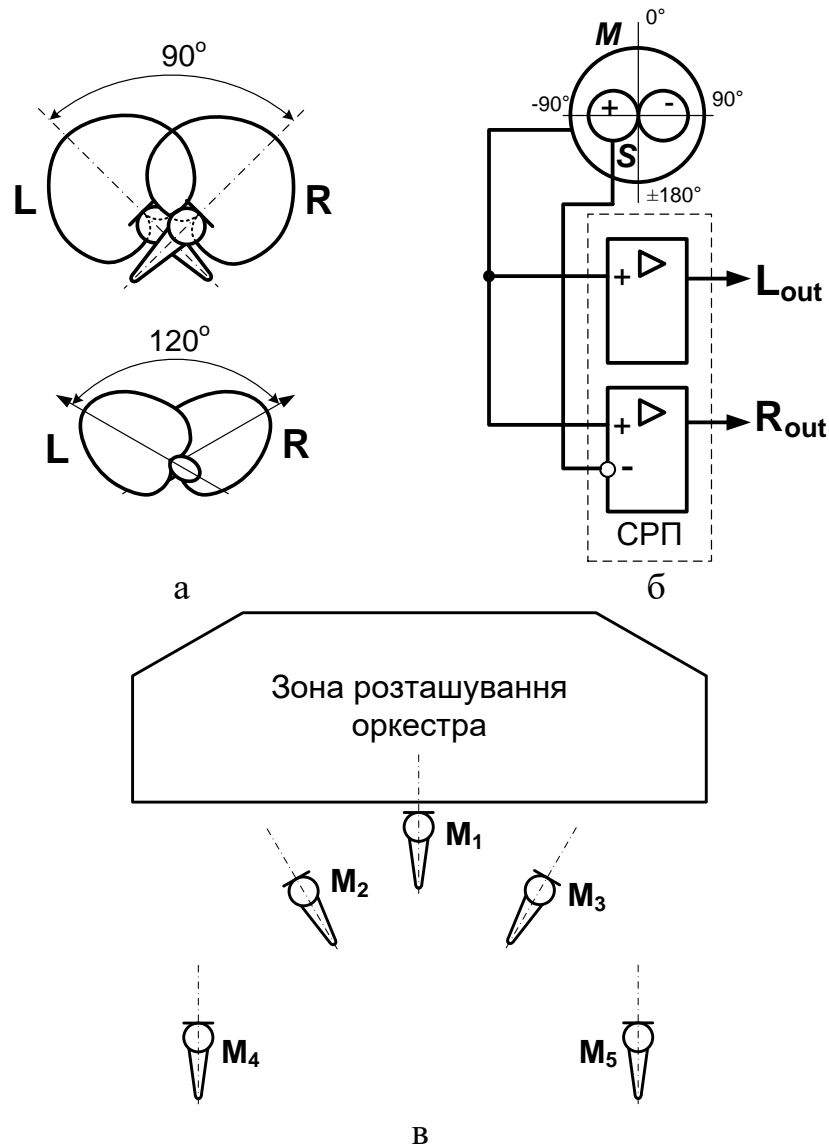


Рисунок 2.24 - Загальна схема розташування мікрофонів за системою XY (а), MS (б), Decca Tree (в)

Blumlein stereo - суміщена стереотехніка, що використовує два мікрофони з характеристикою спрямованості типу «вісімки», встановлених в тій же самій точці під кутом 90°.

Overhead stereo (мікрофони над головою): розміщення мікрофонів вище звукових джерел. При цьому часто виявляється можливим отримати більш натуральний тембр, тому що звуки від індивідуальних інструментів досягають

мікрофонів з більш реальним фазовим розподілом. Крім того, зберігається можливість записати кілька перших відбиттів в приміщенні, що більше відповідає природному оточенню інструментів.

Spaced Omni stereo - неспрямовані мікрофони встановлюють на стійках перед виконавцями на висоті від 1,2 м до 2,4 м (для поліпшення просторовості їх іноді піднімають на 3 м або вище). Така система дає глибину і хороше стереовідчуття, але може вносити фазові спотворення.

Decca Tree - ця техніка була розвинена на студії English Decca Records в середині 1950-х років і її ще до цього часу використовують для запису звуку. Три мікрофона розміщують на стійках на висоті від 3 м до 3,7 м злегка позаду голови диригента. Мікрофони нахилені приблизно на 30° вниз в напрямку до оркестру і встановлені під певним кутом один до одного: один спрямований в центр, два інших – під кутом $\pm 45^\circ$ від центру (рис. 2.24, в).

Відстань між стійками правого і лівого мікрофона приблизно 2 м, центральний мікрофон зсунутий на 1,5 м наперед. Крім того, два додаткових мікрофона розташовують по краях оркестру, зазвичай, трохи позаду, щоб записати реверберацію залу. Ця техніка дає реалістичне стереовідчуття, забезпечує хороший баланс між інструментами оркестру, дозволяє записувати окремо центральний канал, що корисно для мікшування систем типу Surround Sound.

Стереосистеми типу «штучної голови» - два ненаправлені мікрофона розміщують на твердій сфері діаметром 20 см (Sphere Stereo). Діафрагми мікрофонів розташовані на поверхні сфери. Геометричні розміри, які використовують в цій техніці, моделюють базові міжвушні пропорції людської голови і, відповідно, міжвушний час затримки.

Бінауральна стереосистема використовує модель штучної голови, всередині слухових каналів якої розташовані мікрофони. У такій моделі досить точно копіюється форма голови і вушних раковин, а також спеціально підбираються фізико-механічні параметри матеріалів, щоб змодельовати кісткову провідність.

У цій системі звуковий сигнал надходить на мембрану мікрофона вже після обробки в раковині і слуховому каналі, тобто він несе в собі закодовану інформацію про просторове положення джерела, яку можна передавати двома каналами передачі і відтворити на приймальному кінці у стереотелефонах. При цьому слухач отримує досить точне просторове відчуття первинного приміщення.

«Штучна голова» - дуже складний і дорогий пристрій, який виробляється тільки небагатьма фірмами. Наприклад, фірма Neumann випускає модель KU-100, фірма B & K - модель 4128C, фірма Head Acoustics GmbH - модель Aachen Head, фірма IRP - модель KEMAR. Кожна з цих моделей відрізняється певними конструктивними особливостями, наприклад, модель 4128C доповнена моделлю торса.

Модель KU-100 має такі параметри - частотний діапазон від 20 Гц до 20000 Гц, чутливість 20 мВ/Па, еквівалентний рівень звукового тиску 16 дБ-А, максимальний рівень SPL при THD <0,5% дорівнює 135 дБ, динамічний діапазон

Мікрофонні системи для Surround Sound. В наш час відбувається перехід на просторові системи звукозапису і відповідно йде процес створення нових мікрофонних стереосистем для них.

Soundfield - система, яка використовує чотири кардіоїдних капсуля, організованих у формі тетраедра. Первинні сигнали, одержувані від цих капсулів (L_F , R_B , R_F , L_B), утворюють А-формат. За допомогою спеціального цифрового процесора з них формують чотири нових сигнали W , X , Y , Z (В-формат), з яких W відповідає сигналу від неспрямованого мікрофона, X , Y , Z - сигналам від мікрофонів з характеристикою направленості типу «вісімка», орієнтованим ліворуч-праворуч, вперед-назад, вгору-вниз.

Сигнали В-формату спеціальним декодером можуть бути безпосередньо конвертованими в будь-які варіанти сигналів для моно, стерео, surround system (аж до формату 10.1) - рис. 2.25, а. Для конвертації в найпоширеніший формат 5.1 фірма Soundfield розробила спеціальний процесор SP-451.

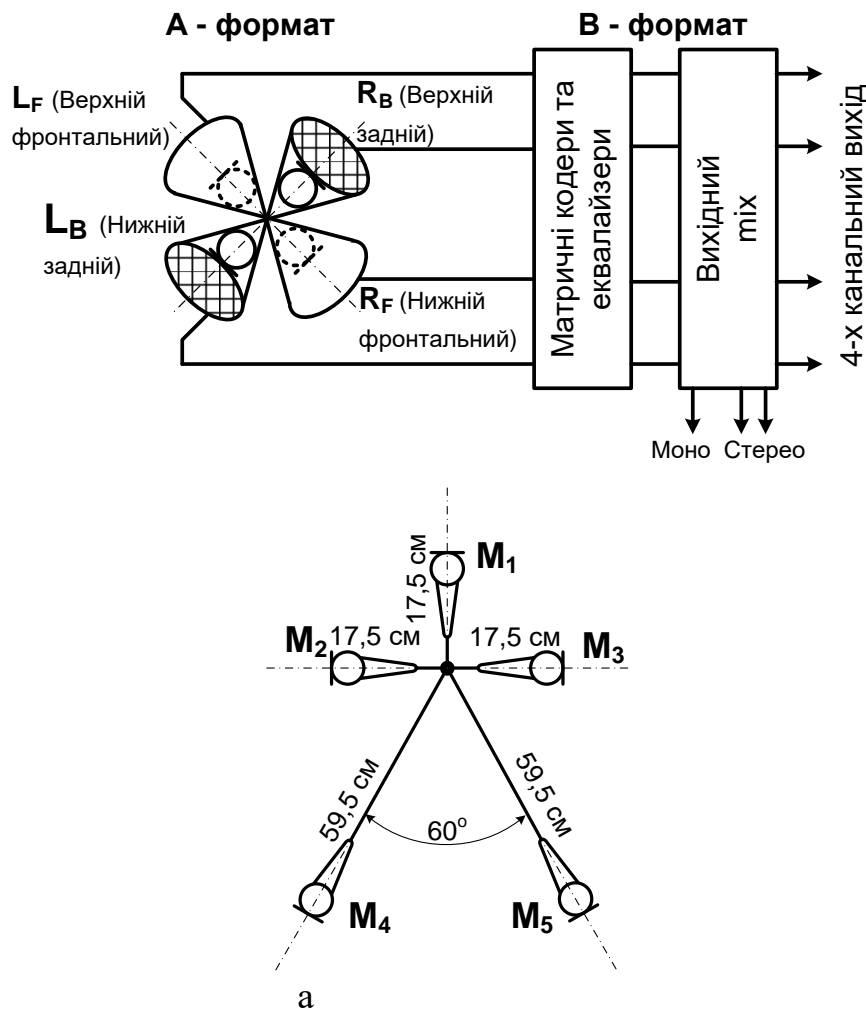


Рисунок 2.25 - Принцип роботи мікрофона Soundfield (а) і розташування мікрофонів системи SPL (б)

Завдяки компактності великих можливостей процесорної обробки і сумісності з більшістю відомих стерео і surround-форматів ця мікрофона система

знаходить широке застосування в різних видах просторового звукозапису і звукопередавання (наприклад, за системою Ambisonics).

Різновидом цієї системи можна вважати запропоновану фірмою Schoeps мікрофонну систему, що складено з одного неспрямованого мікрофона і трьох мікрофонів з характеристикою спрямованості типу «вісімка», закріплених в одній точці компактно один з одним. Така система дозволяє записувати відразу сигнали В-формату. У цій системі дещо простіша процесорна обробка. Область застосування її така ж, як і у попередньої.

SPL array - система являє собою єдиний блок з п'ятьма рознесеними спрямованими мікрофонами, відстань між якими і їх орієнтацію можна гнучко змінювати в процесі запису (рис. 2.25, б).

Системи з адаптивним цифровим управлінням (Audio technica AT 895, Microtech Gefell KEM 970 тощо). Мають можливості цифрової обробки сигналів, що дозволяє створювати свого роду мікрофонні антени, в яких за допомогою цифрових фільтрів синтезовано діаграми спрямованості керованої форми, ширини і орієнтації, адаптовані до різноманітних умов навколишнього простору і завдань обробки звуку.

Такі системи знаходять застосування в системах звукозапису і озвучення. Приклад системи Audio technica AT 895, що складено з центрального гостроспрямованого мікрофона і чотирьох кардіоїдних мікрофонів, наведено на рис. 2.26.

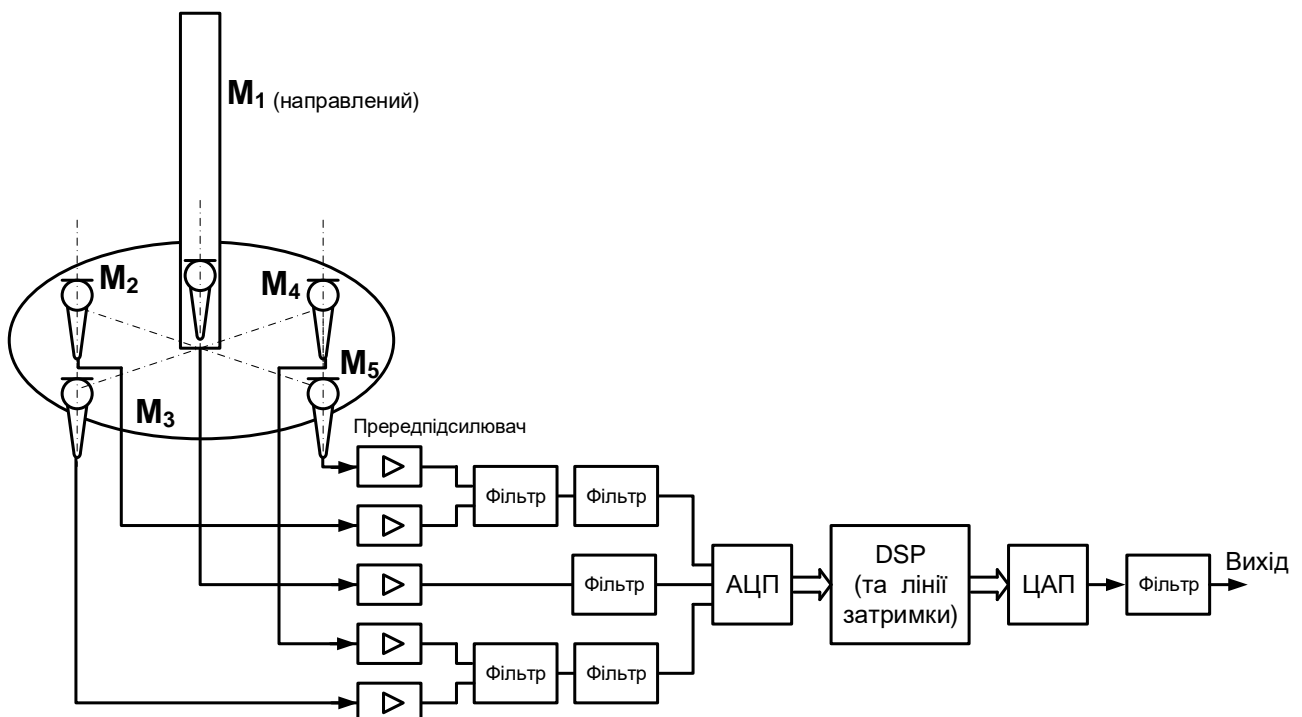


Рисунок 2.26 - Адаптивна мікрофонна система Audio technica AT 895

Контрольні питання

1. Назвіть основні класифікаційні ознаки мікрофонів
2. Назвіть основні технічні параметри мікрофонів та наведіть орієнтовні числові значення параметрів.
3. Поясніть принцип дії мікрофонів приймачів тиску та приймачів градієнта тиску.
4. Наведіть вираз чутливості мікрофона, складеного із чутливостей окремих ланок.
5. Поясніть принцип роботи з перетворення акустичних коливань у електричні вугільного, електромагнітного та п'єзоелектричного мікрофонів.
6. Поясніть конструкцію та принцип роботи з перетворення акустичних коливань у електричні електродинамічного котушкового мікрофона.
7. Поясніть конструкцію та принцип роботи з перетворення акустичних коливань у електричні електростатичного (конденсаторного) мікрофона.
8. Поясніть принцип та необхідність комбінації мікрофонів.
9. Поясніть способи корекції конструктивних елементів мікрофонів для отримання більш лінійної частотної характеристики.
10. Поясніть конструкцію та принцип роботи з перетворення акустичних коливань у електричні електродинамічного стрічкового мікрофона.
11. Наведіть конструкцію та принцип роботи ларингофона.
12. Поясніть особливості побудови радіомікрофонів та «цифрових» мікрофонів.
13. Назвіть приклади та особливості застосування роздільних мікрофонних стереосистем.
14. Назвіть приклади та особливості застосування суміщених мікрофонних стереосистем.
15. Назвіть приклади та особливості застосування мікрофонних стереосистем для Surround Sound.

ГУЧНОМОВЦІ ТА ТЕЛЕФОНИ

3.1 ВИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ, ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ

Гучномовець і телефон - це пристрої для перетворення електричних коливань в звукові, акустичні коливання повітряного середовища.

Є гучномовці (ГМ), засновані на релейному принципі, в яких енергія постійного потоку повітря перетворюється в акустичну енергію під дією акустичних або механічних коливань (наприклад, пневматичні гучномовці).

Оскільки гучномовці і телефони є останніми ланками будь-якого радіомовного (звуковідтворювального) тракту або лінії зв'язку, то їх властивості мають вирішальний вплив на його якість роботи в цілому.

За **способом перетворення** гучномовці і телефони поділяють на електромагнітні (в основному телефони), електродинамічні котушкові, ізодинамічні, електростатичні, п'єзоелектричні і деякі інші.

За **видом випромінювання** звуку гучномовці поділяють на гучномовці безпосереднього випромінювання (дифузорні, куполоподібні, стрічкові) і рупорні.

Розрізняють гучномовці за **споживаною електричною потужністю** (потужні, малопотужні), а також і за **чутливістю**.

Слід зазначити, що дифузорні гучномовці без зовнішнього акустичного оформлення (так звані головки гучномовців) з причин, викладених нижче, потребують зовнішнього оформлення, спільно з яким, а також з такими пасивними елементами, як трансформатори, розділові фільтри, атенюатори, утворюють акустичні випромінювальні системи. Останні зазвичай і називають гучномовцями або акустичними системами (АС). Для озвучення та звукопідсилення застосовують групові випромінювачі - звукові колонки.

Оскільки телефони призначені для роботи безпосередньо на обсяг слухового каналу і не є випромінюючими системами, то їх характеристики дещо відрізняються від характеристик гучномовців.

Гучномовці характеризують значною кількістю параметрів.

ГОСТ Р 53575-2009 (Гучномовці. Методи електроакустичних вимірювань) встановлено визначення характеристик гучномовців і термінів, що до них належать, найбільш вживані з яких наведено нижче.

Гучномовець - *пристрій для ефективного випромінювання звуку в навколишній простір в повітряному середовищі, що містить одну або кілька головок гучномовців, необхідне акустичне оформлення, необхідні електричні пристрої (фільтри, трансформатори, регулятори тощо).*

Пасивний гучномовець - гучномовець, що не збільшує енергію електричного сигналу, яка надходить на вхід.

Головка гучномовця - пасивний електроакустичний перетворювач, призначений для перетворення сигналів звукової частоти з електричної форми в акустичну.

Акустичне оформлення – конструктивний елемент гучномовця, що забезпечує ефективне випромінювання звуку (акустичний екран, ящик, рупор тощо).

Односмуговий гучномовець - гучномовець, всі головки якого працюють в одному і тому ж діапазоні частот.

Багатосмуговий гучномовець - гучномовець, головки якого працюють в двох або більше різних діапазонах частот.

Абонентський гучномовець - гучномовець, призначений для відтворення передач низькочастотного каналу мережі проводового мовлення.

Рупорний гучномовець - гучномовець, акустичним оформленням якого є жорсткий рупор.

Звукова колонка – гучномовець, який відрізняється спрямованістю звуковипромінювання в різних площинах, що містить, принаймні, один лінійний ланцюжок однотипних гучномовців або головок гучномовців і призначений для озвучення приміщень і відкритих просторів.

Звуковий монітор - гучномовець досить високої якості звуковідтворення, призначений для проведення контролю звукових сигналів.

Акустична система - гучномовець, призначений для використання в якості компонента в побутовій радіоелектронній апаратурі.

Відкрита акустична система - акустична система, в якій вплив пружності повітря в обсязі акустичного оформлення дуже малий, а випромінювання передньої і тильної сторін рухомої системи головки гучномовця не ізольовані один від одного в області низьких частот.

Закрита акустична система - акустична система, в якій пружність повітря в об'ємі акустичного оформлення порівнянна з пружністю рухомої системи головки гучномовця, а випромінювання передньої і тильної сторін рухомої системи ізольовані один від одного у всьому діапазоні частот.

Широкозмугова головка гучномовця - головка, призначена для однозмугового гучномовця.

Вузькозмугова головка гучномовця - головка, що призначена для багатосмугового гучномовця, яка може бути низькочастотною, середньочастотною або високочастотною.

Робоча площа - площа випромінювальних отворів головок гучномовців. Якщо робочу площину не зазначено в нормативно-технічній документації на даний гучномовець, то для гучномовця, що містить декілька випромінювальних отворів, які не лежать в одній площині, за робочу площину приймають ту, на якій розташовані випромінювальні отвори високочастотних головок багатосмугового гучномовця або більшість випромінювальних отворів однозмугового гучномовця.

Робочий центр - точка, що лежить на робочій площині, від якої проводять відлік відстані від гучномовця. Якщо робочий центр не зазначено в документації, то за нього слід приймати: геометричний центр симетрії випромінювальних отворів - для гучномовця, що має один випромінювальний отвір; геометричний центр симетрії випромінювальних отворів або проєкцій цих отворів на робочу площину - для однозмугового гучномовця; геометричний центр симетрії випромінювальних отворів високочастотних головок гучномовців - для багатосмугового гучномовця.

Робоча вісь - пряма, що проходить через робочий центр гучномовця і перпендикулярна до робочої площини.

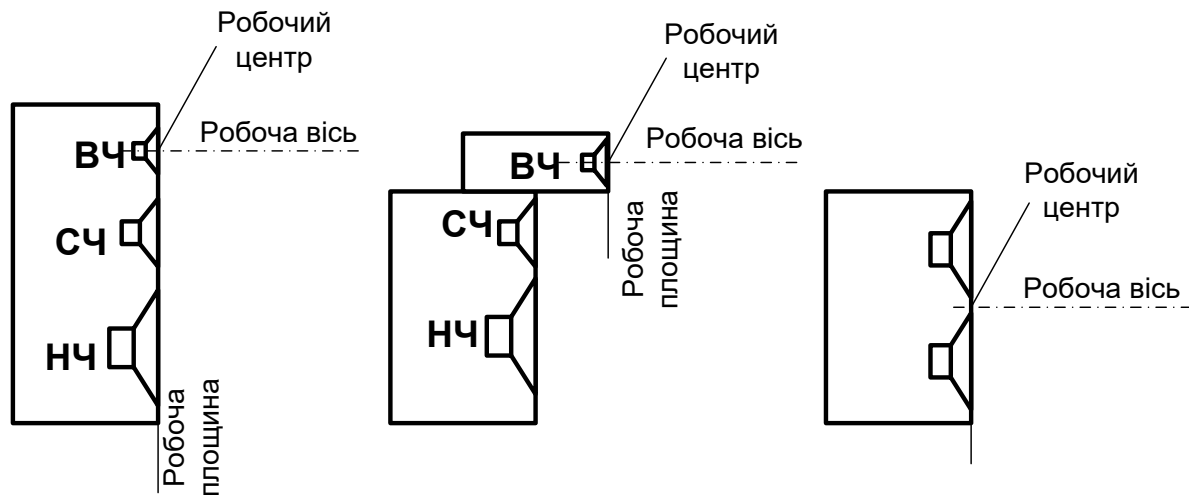


Рисунок 3.1 - Розташування робочої осі, центру, площини на гучномовцях

Номінальний електричний опір - заданий в нормативно-технічній документації активний опір, яким заміщають опір гучномовця для визначення електричної потужності, що підведена до нього. Мінімальне значення модуля повного електричного опору гучномовця в заданому діапазоні частот не повинно бути менше $0,8R_{\text{ном } i}$, де $R_{\text{ном } i} = 2; 4; 8; 12 \text{ Ом}$.

Номінальна потужність - задана електрична потужність, за якої нелінійні спотворення гучномовця не повинні перевищувати нормоване значення. Номінальна потужність $P_{\text{ном}}$ - максимальна електрична потужність, яку підведено до гучномовця, що обмежена тепловою та механічною міцністю гучномовця і виникненням нелінійних спотворень, які перевищують задану величину. Зазвичай вона менше паспортної (паспортна потужність – потужність, що наведена у паспорті на гучномовець). Гучномовець не повинен виходити з ладу за тривалої роботи з цією потужністю.

За **паспортну потужність** приймають найбільшу неспотворену потужність підсилювача, з якою гучномовець може задовільно працювати з реальним звуковим сигналом довгий час без теплових і механічних пошкоджень.

Максимальна шумова потужність - електрична потужність спеціального шумового сигналу в заданому діапазоні частот, яку гучномовець тривало витримує без теплових і механічних ушкоджень. Максимальна шумова потужність повинна бути не менше номінальної потужності.

Максимальна синусоїдна потужність - електрична потужність безперервного синусоїдного сигналу в заданому діапазоні частот, що гучномовець тривалий час витримує без теплових і механічних ушкоджень. Максимальна синусоїдна потужність повинна бути не менше номінальної потужності. Для багатосмугового гучномовця може бути зазначено кілька максимальних синусоїдних потужностей, кожна для своєї смуги частот.

Максимальна короткотривала потужність - електрична потужність спеціального шумового сигналу в заданому діапазоні частот, яку гучномовець

витримує без незворотних механічних ушкоджень протягом 1 с (випробування повторюють 60 разів з інтервалом 1 хв.). Максимальна короткотривала потужність повинна бути не менше максимальної шумової потужності гучномовця.

Максимальна довготривала потужність - електрична потужність спеціального шумового сигналу в заданому діапазоні частот, що гучномовець витримує без незворотних механічних ушкоджень протягом 1 хв. (випробування повторюють 10 разів з інтервалом в 2 хв.). Максимальна довготривала потужність повинна бути не менше максимальної шумової потужності гучномовця.

Частота основного резонансу головки гучномовця - частота синусоїдного сигналу збудження, для якій значення модуля повного електричного опору головки гучномовця має свій перший максимум (для зростаючої частоти, див. рис. 3.2). Частота основного резонансу може бути вказана і для гучномовця.

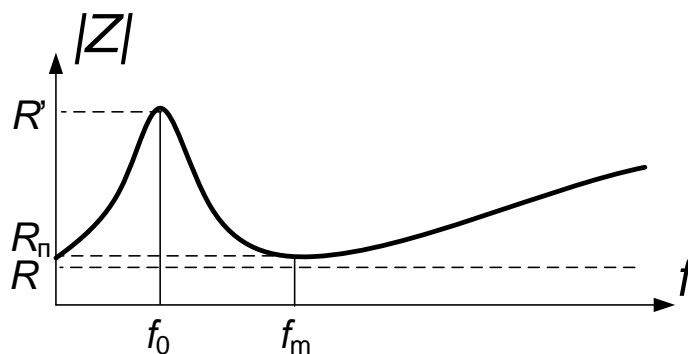


Рисунок 3.2 - Залежність опору гучномовця від частоти

Добротність головки гучномовця - відношення інерційної (пружної) складової механічного опору рухомої системи головки гучномовця на частоті основного резонансу до активної складової (міра загасання вільних коливань рухомої системи головки гучномовця).

Механічна добротність головки гучномовця - добротність, обумовлена втратами в механічних елементах рухомої системи головки гучномовця (добротність за відсутності струму в електричному колі головки гучномовця).

Електрична добротність головки гучномовця - добротність, обумовлена наявністю струму проти-ЕРС в електричному колі головки гучномовця.

Повна добротність головки гучномовця - добротність головки гучномовця, обумовлена сумарним впливом механічних втрат і струмом проти-ЕРС в електричному колі головки.

Еквівалентний об'єм головки гучномовця - закритий об'єм повітря, який має акустичну пружність, що дорівнює пружності рухомої системи головки гучномовця.

Полярність головки гучномовця - відповідна полярність електричної напруги на виводах головки гучномовця, що викликає рух рухомої системи головки в заданому напрямку. Полярність багатосмугового гучномовця визначають за полярністю низькочастотної головки гучномовця.

Номінальний діапазон частот - діапазон частот, в якому задані електричні і електроакустичні характеристики гучномовця.

Частотна характеристика за звуковим тиском - графічна або чисельна залежність від частоти рівня звукового тиску, що створює гучномовець в відповідній точці вільного поля, яка знаходиться на певній відстані від робочого центру, за постійного значення напруги на виводах гучномовця.

Середній звуковий тиск $p_{\text{ср}}$ - середньоквадратичне значення звукового тиску, що створює гучномовець в заданому діапазоні частот і точці вільного поля в разі підведення до нього напруги, яка відповідає заданій електричній потужності. Усереднення проводять за значеннями звукового тиску на частотах (в смугах частот), розподілених рівномірно в логарифмічному масштабі.

Осьова чутливість за напругою - відношення звукового тиску p_1 , що створює гучномовець на робочій осі на відстані 1 м від робочого центру у вільному полі, до напруги, яка його спричинила

$$E_{\text{ос}} = \frac{p_1}{U}.$$

Ця чутливість залежить від частоти.

Характеристична чутливість E_x - середній звуковий тиск, що створює гучномовець в заданому діапазоні частот на робочій осі, зведений до відстані 1 м від робочого центру і електричній потужності, яку підведено до гучномовця, що дорівнює **1 Вт**. Характеристична чутливість E_x - відношення середнього звукового тиску $p_{\text{ср}}$, що створює гучномовець в номінальному діапазоні частот на робочій осі на відстані 1 м від робочого центру, до кореню квадратного з електричної потужності $P_{\text{е}}$, яку підведено до гучномовця,:

$$E_x = \frac{p_{\text{ср}}}{\sqrt{P_{\text{е}}}} = \frac{p_{\text{ном}}}{\sqrt{P_{\text{ном}}}} = \frac{p_{\text{ср}}}{\sqrt{0,1}}.$$

Між характеристичної чутливістю і середнім стандартним звуковим тиском існує прямий зв'язок:

$$p_{\text{ср}} = E_x \sqrt{0,1}.$$

Рівень характеристичної чутливості - 20-кратний десятиковий логарифм відношення характеристичної чутливості до чутливості $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{Вт}^{-1/2}$

Середній стандартний звуковий тиск $p_{\text{ст}}$ - середній звуковий тиск, що створює гучномовець в заданому діапазоні частот на робочій осі, зведений до відстані 1 м від робочого центру і електричній потужності, яку підведено до гучномовця, у **0,1 Вт**.

Номінальний звуковий тиск $p_{\text{ном}}$ - середній звуковий тиск, що створює гучномовець в заданому діапазоні частот на робочій осі, зведений до відстані 1 м від робочого центру і електричній потужності, яку підведено до гучномовця, що дорівнює номінальній потужності.

Характеристична потужність - електрична потужність, яку необхідно підвести до гучномовцю з тим, щоб забезпечити номінальний середній звуковий тиск, який дорівнює 1 Па.

Нерівномірність частотної характеристики звукового тиску – різниця між максимальним і мінімальним значеннями рівнів звукового тиску (відношення максимального звукового тиску до мінімального, виражене в

децибелах) в заданому діапазоні частот. Піки і провали частотної характеристики вужче 1/8 октави не враховують.

Типова частотна характеристика - графічна залежність рівня звукового тиску від частоти з позначеним полем допустимих відхилів і рівнем середнього звукового тиску в заданому діапазоні частот, нанесеним у вигляді прямої горизонтальної лінії.

Діапазон відтворюваних частот - діапазон частот, усередині якого частотна характеристика звукового тиску, усереднена в 1/3 октавних смугах, не виходить за межі поля допусків.

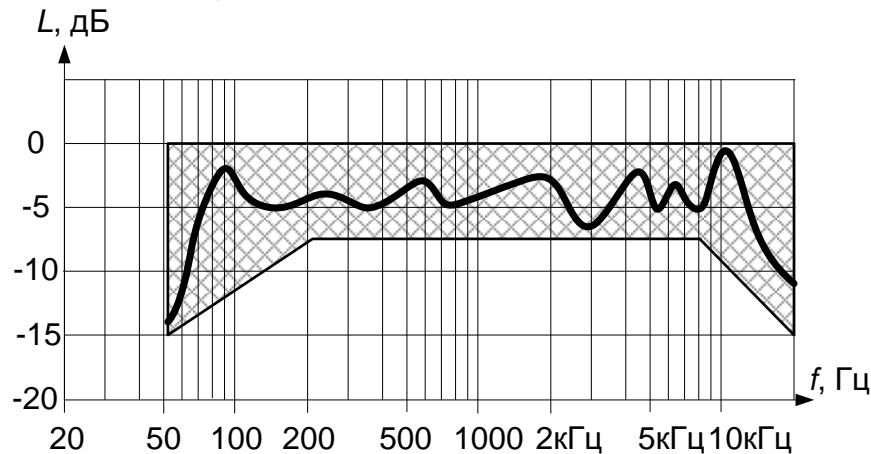


Рисунок 3.3 - Частотна характеристика гучномовця

Характеристика спрямованості - залежність звукового тиску p_θ , що створює гучномовець в точці вільного поля (що знаходяться на однаковій відстані від робочого центру), від кута між робочою віссю гучномовця і напрямом на зазначену точку. Зазвичай, цю характеристику нормують відносно осевого звукового тиску p_{oc} :

$$R(\theta) = \frac{p_\theta}{p_{oc}} \quad \text{при } r = \text{const.}$$

Характеристика спрямованості змінюється в залежності від частоти, тому її вимірюють або на ряді частот, або для заданої смуги частот.

Діаграма спрямованості - графічна залежність в умовах вільного поля рівня звукового тиску для даних частот (смуги частот) і відстані до робочого центру гучномовця від кута між робочою віссю гучномовця і напрямом в точку вимірювання. Тобто це графічна залежність характеристики спрямованості в площині.

Діаграму спрямованості, зазвичай, зображують у полярних координатах (рис. 3.4). При цьому радіус-вектор відповідає величині $R(\theta)$. Іноді діаграму спрямованості будують для значень $20\lg R(\theta)$ в децибелах. Визначають її для ряду площин, що проходять через робочу вісь. Якщо випромінювач гучномовця має осьову симетрію, то його характеристика спрямованості теж буде мати осьову симетрію, але тільки для однієї площини.

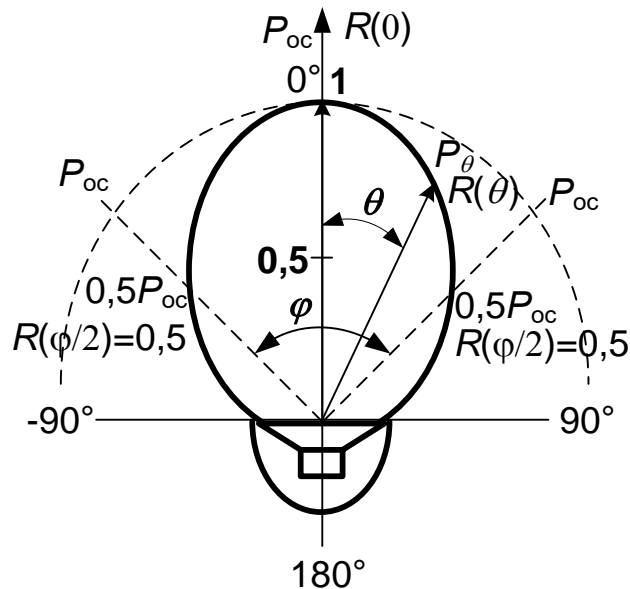


Рисунок 3.4 - Діаграма спрямованості гучномовця (φ - кут випромінювання)

Коефіцієнт спрямованості - відношення звукового тиску, виміряного під заданим кутом щодо робочої осі, до звукового тиску на робочій осі для однієї і тієї ж частоти (смути частот) і на одній і тієї ж відстані від робочого центру гучномовця.

Індекс спрямованості - 20-кратний десятковий логарифм коефіцієнта спрямованості.

Кут випромінювання - кут, в межах якого коефіцієнт спрямованості не менше 0,5.

Коефіцієнт осьової концентрації - відношення квадрата значення звукового тиску, виміряного на даній частоті (смузі частот) в умовах вільного поля на робочій осі на заданій відстані від робочого центру гучномовця, до усередненого по сфері, в центрі якої знаходиться робочий центр гучномовця, квадрату значення звукового тиску, виміряного за тих же умов і на тій же відстані від робочого центру

$$\Omega = \frac{P_{oc}^2}{P_{\theta_{cp}}^2}.$$

Отже, для неспрямованих гучномовців коефіцієнт осьової концентрації дорівнює одиниці, так як $P_{oc}^2 = P_{\theta_{cp}}^2$, а для спрямованих - більше одиниці (він може досягати декількох десятків). Так як акустична потужність випромінювача є потік енергії через всю сферичну поверхню, то для неспрямованого випромінювача її можна визначити як:

$$P_{nc} = 4\pi r^2 I_r = 4\pi r^2 \frac{P_{nc}}{\rho c},$$

де I_r - інтенсивність звуку на відстані r від робочого центру гучномовця; P_{nc} - звуковий тиск на тій же відстані; ρc - питомий акустичний опір.

Звідси випливає, що випромінювана **акустична потужність** гучномовця **пропорційна квадрату звукового тиску, який створено ним**. Виходячи з

цього, акустична потужність спрямованого випромінювача дорівнюватиме акустичній потужності неспрямованого випромінювача, що створює звуковий тиск, який дорівнює p_c за інших рівних умов, тобто

$$P_c = 4\pi r^2 \frac{p_{\theta \text{cp}}^2}{\rho c}.$$

Отже, **коефіцієнт осової концентрації** можна визначити як відношення акустичних потужностей неспрямованого і спрямованого випромінювачів за умови рівності їх осового звукового тиску

$$\Omega = \frac{P_{\text{nc}}}{P_c} \text{ при } p_{\text{oc nc}} = p_{\text{oc c}}.$$

Для спрямованого гучномовця відповідно акустична потужність дорівнює

$$P_c = \frac{P_{\text{nc}}}{\Omega} = 4\pi r^2 \frac{p_{\text{oc c}}^2}{\Omega \rho c}.$$

Виходячи з цього коефіцієнт осової концентрації можна визначити як відношення квадратів осових значень звукового тиску, що створено спрямованим і неспрямованим гучномовцями, за умови, що вони випромінюють однакову потужність, тобто

$$\Omega = \frac{p_{\text{oc c}}^2}{p_{\text{oc nc}}^2} \text{ при } P_c = P_{\text{nc}}.$$

Це визначення показує, що осова концентрація енергії більше у того гучномовця, у якого за однакової випромінюваної потужності звуковий тиск, що створено ним на осі, буде більшим.

Індекс осової концентрації - 10-кратний десятиковий логарифм коефіцієнта осової концентрації.

Середня акустична потужність - середнє арифметичне значення акустичної потужності, випромінюваної гучномовцем в певному діапазоні частот. Усереднення проводять за значеннями акустичної потужності на частотах (в смугах частот), розподілених рівномірно в логарифмічному масштабі.

Наведений коефіцієнт корисної дії - відношення акустичної потужності, випромінюваної гучномовцем на даній частоті (смузі частот), до підведеної електричної потужності.

ККД гучномовця. У паспортних даних ККД гучномовця, зазвичай, не наводять. Замість нього зазначають стандартний звуковий тиск або характеристичну чутливість, що однозначно пов'язані між собою і з акустичною потужністю.

Якщо підвести до гучномовцю електричну потужність $P_e = 0,1$ Вт, то згідно з визначенням стандартного звукового тиску $p_{\text{oc}} = p_{\text{ст}}$. Для цієї електричної потужності для $r = 1$ м отримуємо акустичну потужність

$$P_a \Big|_{P_e=0,1} = 4\pi r^2 \frac{p_{\text{ст}}^2}{\Omega \rho c}$$

і ККД

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} = 4\pi \frac{P_{ст}^2}{0,1 \cdot \Omega \rho c} \approx 0,3 \frac{P_{ст}^2}{\Omega}$$

де $p_{ст}$ в Паскалях, $\rho c = 412 \text{ кг/м}^2\text{с}$.

Відповідно до визначення номінального звукового тиску при $P_e = P_{ном}$ маємо $P_{ос} = P_{ном}$, звідки

$$\eta = \frac{P_{а ном}}{P_{ном}} = 4\pi \frac{P_{ном}^2}{\Omega \rho c P_{ном}} = 4\pi \frac{E_x^2}{\Omega \rho c} \approx 0,03 \frac{E_x^2}{\Omega},$$

де E_x - характеристична чутливість в $\frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Вт}}}$.

Коефіцієнт гармонік n -го порядку - відношення, вираженого у відсотках ефективного значення звукового тиску сигналу, що містить частоту збудження і всі її гармоніки в разі збудження гучномовця синусоїдним сигналом.

Коефіцієнт нелінійних спотворень вимірюють для ряду заданих частот під час підведення до гучномовця синусоїдної напруги, відповідної номінальній потужності, а іноді і для так званої робочої потужності.

Сумарний коефіцієнт гармонік - корінь квадратний з суми квадратів коефіцієнтів гармонік всіх порядків.

Коефіцієнт інтермодуляційних спотворень n -го порядку - відношення, виражене у відсотках, ефективного значення звукового тиску суми спектральних компонент з частотами $f_2 \pm (n - 1)f_1$ до звукового тиску на частоті f_2 , де n - будь ціле число, крім одиниці; f_1 і f_2 - частоти сигналу, що підводиться до гучномовця ($f_1 \ll f_2$).

Сумарний коефіцієнт інтермодуляційних спотворень - корінь квадратний з суми квадратів коефіцієнтів інтермодуляційних спотворень всіх порядків.

Призвук - нелінійні спотворення, що виникають при збудженні гучномовця синусоїдальним сигналом. Суб'єктивно (на слух) сприймається як тон (група тонів), що звучить одночасно з тоном частоти збудження.

Деренчання - нелінійні спотворення, що виникають при збудженні синусоїдним сигналом гучномовця, який має механічні дефекти. Суб'єктивно (на слух) сприймають як неприємний звук, який не має вираженого тонального забарвлення.

Може скластися враження, що в стандарті гучномовець характеризують занадто великою кількістю параметрів, проте це не так. Адже стандарт розрахований не тільки на споживачів, але і на розробників головок гучномовців і акустичних систем. Ряд параметрів всієї продукції, що випускають, контролюють в процесі виробництва, а ряд параметрів, перевірка яких пов'язана з більшою витратою часу, що перевищує час випуску одного виробу, контролюють вибірково з партій виробів, випущених різними змінами. Серед перерахованих є параметри, які перевіряють в основному на стадії розроблення головок гучномовців. Параметри, які прийнято вважати найважливішими для споживача, мають бути наведені в паспорті на головку гучномовця або акустичну систему.

Пояснимо коротко значення деяких параметрів.

Номінальний електричний опір, максимальна шумова потужність і рівень характеристичної чутливості визначають тип підсилювача звукових частот, з яким може працювати дана головка гучномовця або акустична система;

частота основного резонансу, поряд із значенням повної добротності головки гучномовця, визначає нижню ефективно відтворювану частоту;

еквівалентний об'єм головки гучномовця визначає об'єм акустичного оформлення, тобто геометричні розміри корпусу гучномовця, що у всіх випадках є важливим споживчим параметром;

електричну економічність гучномовця визначає значення характеристичної потужності, яка обернено пропорційно пов'язана з рівнем характеристичної чутливості. Зниження чутливості на 3 дБ призводить до подвоєння характеристичної потужності, тобто й потужності підсилювача від якого працює гучномовець.

Найважливішим параметром гучномовця є його частотна характеристика по звуковому тиску і її нерівномірність. Чим менше нерівномірність частотної характеристики, тим вище якість звучання гучномовця при рівних інших параметрах. Стосовно до головок гучномовців рекомендація стандарту щодо неврахування піків і провалів вужче 1/8 октави не є прогресивною, оскільки наявність на частотній характеристиці головки гучномовця піків і провалів свідчить про неякісне виконання дифузора, про наявність в ньому стоячих хвиль, тобто про недоробку головки гучномовця. Стандарт повинен бути завжди прогресивним і покликаний сприяти підвищенню якості продукції. Аналогічне зауваження можна зробити і до формулювання ефективно відтворюваного діапазону частот, в якому, по суті, закладена припустимість нерівномірності частотної характеристики у 10 дБ. Що стосується нелінійних і інтермодуляційних спотворень, то вони повинні бути не вище зазначених в спеціальних стандартах, а такі параметри, як призвук або деренчання, відсутні взагалі у гучномовців, які пройшли відділ технічного контролю, їх наявність свідчить про несправність гучномовця.

Осьова чутливість гучномовця може бути представлена як добуток чутливості окремих ланок, що входять в нього

$$E_{\text{ос}} = \frac{p_1}{U} = \frac{p_1}{v_m} \cdot \frac{v_m}{F} \cdot \frac{F}{i} \cdot \frac{i}{U},$$

де $\frac{p_1}{v_m}$ - акустична чутливість;

$\frac{v_m}{F} = \frac{1}{z_{\text{мех}}}$ - механічна чутливість;

$z_{\text{мех}}$ - повний механічний опір рухомої системи гучномовця (модуль);

$\frac{F}{i} = K$ - коефіцієнт електромеханічного зв'язку;

$\frac{i}{U} = \frac{1}{Z_{\text{вх}}}$ - електрична характеристика;

$Z_{\text{вх}}$ - вхідний електричний опір гучномовця (модуль);

p_1 - звуковий тиск на відстані 1 м від гучномовця;

U – напруга, що підводиться до гучномовця.

3.2 ДИФУЗОРНІ ВИПРОМІНЮВАЧІ

У дифузорних гучномовцях діафрагма, що входить у його механічну рухому систему, виконує як функцію перетворення механічних коливань в акустичні, так і функцію випромінювання звуку в навколишнє середовище. Тому цю діафрагму називають **дифузором**, тобто **розсіювачем**, а гучномовець відносять до гучномовців з безпосереднім випромінюванням.

У загальному випадку дифузор має складну форму, але експерименти показують, що всі основні висновки про випромінювання звукових хвиль за допомогою дифузора можна отримати з достатньою точністю в разі його заміни плоскою діафрагмою, що хитається як поршень. Це забезпечують відповідним кріпленням дифузора до корпусу гучномовця: по-перше, гнучким і, по-друге, що не допускає інших коливань, крім осьового.

Процес випромінювання звукових хвиль досить простий: при своїх коливаннях діафрагма приводить в рух частинки прилеглого до неї середовища, створюючи позмінно стиснення і розрідження його. Коливання цих частинок передаються сусіднім шарам середовища тощо. Створюються хвилі стиснення і розрідження, які рухаються зі швидкістю звуку вдалину.

Внаслідок принципу нерозривності газоподібного (і рідинного) середовища швидкість коливань діафрагми v_m і прилеглих до неї частинок середовища повинна бути однаковою, тобто $v_m = v_v$. Інакше довелось б допустити появу вакууму близько діафрагми або проникнення частинок середовища в тверду діафрагму.

При коливаннях діафрагми середовище створює опір цим коливанням. Ясно, що в безповітряному просторі діафрагму легше коливати, ніж в повітрі, а у повітрі легше, ніж у воді. Цей опір називають опором випромінювання $z_{\text{випр}}$. Опір випромінювання додано до механічного опору діафрагми $z_{\text{м.д.}}$, тобто маємо

$$\frac{F}{v_m} = z_{\text{м.д.}} + z_{\text{випр}} = z_m.$$

Опір випромінювання за своєю суттю є акустичним опором звукової хвилі в місці зіткнення середовища з випромінювальною поверхнею, тобто

$$z_{\text{випр}} = \xi_{aR} S = R_{\text{випр}} + jX_{\text{випр}},$$

де S - площа випромінювача; ξ_{aR} - середній питомий акустичний опір середовища біля випромінювача. Повна потужність, яку випромінює випромінювач

$$P_{\text{випр}} = v_m^2 z_{\text{випр}}.$$

У загальному випадку опір випромінювання комплексний. Фізично це означає, що випромінювана потужність має активну складову, що визначає потік енергії, що поширюється в нескінченність, і реактивну, що визначає запас енергії, яка створена в звуковому полі. Реактивна складова частково повертається у випромінювач назад після закінчення вимушених коливань діафрагми.

Визначимо опір випромінювання для одного з основних випромінювачів - випромінювача нульового порядку. Це пульсуюча куля, що випромінює

сферичну хвилю. Виходячи з цього для випромінювача з радіусом R і поверхнею, що випромінює площею S

$$z_{\text{випр}} = \rho c S \left[\frac{\omega^2 R^2}{\omega^2 R^2 + c^2} + j \frac{\omega R c}{\omega^2 R^2 + c^2} \right] = \rho c S [K_{1\text{випр}} + jK_{2\text{випр}}],$$

$$K_{1\text{випр}} = \frac{y^2}{y^2 + 1}; \quad K_{2\text{випр}} = \frac{y}{y^2 + 1}; \quad y = \frac{\omega R}{c} = \frac{2\pi R}{\lambda},$$

де S - площа випромінювача; $K_{1\text{випр}}$, $K_{2\text{випр}}$ - безрозмірні коефіцієнти опору випромінювання.

На рис. 3.5, а (криві 1 і 5) наведено залежності безрозмірних коефіцієнтів активного і реактивного опорів від частоти, точніше, від співвідношення довжини хвилі і розмірів випромінювача. Як наведено на цьому графіку, на низьких частотах, тобто при малих відношеннях R/λ активний опір випромінювання зростає пропорційно квадрату частоти: при відношенні $R/\lambda \geq 1$ він поступово наближається до опору плоскої хвилі $\rho c S$ (безрозмірний коефіцієнт наближається до одиниці). Реактивна складова швидко зменшується зі збільшенням частоти і прагне до нуля. Дійсно, на високих частотах ($R/\lambda \gg 1$) випромінювач практично створює плоску хвилю, для якої акустичний опір чисто активний.

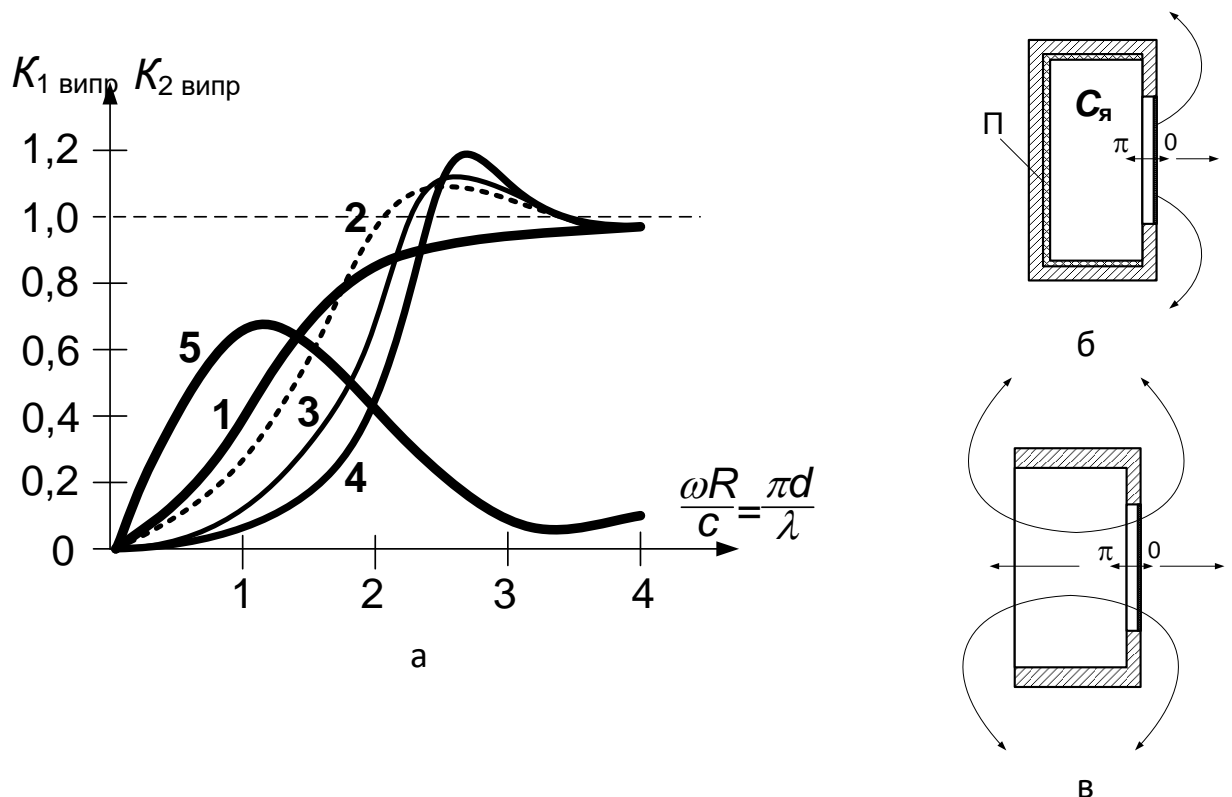


Рисунок 3.5 - До визначення характеристик випромінювачів:

а) залежність безрозмірних коефіцієнтів активного 1, 2, 3, 4 і реактивного 5 опорів випромінювання від співвідношення між розмірами випромінювача і довжиною звукової хвилі: 1 і 5 - для сферичного випромінювача, 2 - для поршневої діафрагми в нескінченному екрані, 3 - для поршневої діафрагми в закритому ящику;

4 - те ж саме, в ящику з відкритою задньою стінкою;

б) закритий ящик; в) ящик з відкритою задньою стінкою

Неважко показати, що реактивна складова опору випромінювання являє собою інерційний опір $\omega m_{\text{вн}}$, тобто є опором деякої маси повітря $m_{\text{вн}}$:

$$m_{\text{вн}} = \frac{\rho c S}{\frac{\omega^2 R^2}{c^2} + 1}.$$

Маса випромінювача як би збільшується на цю величину, і тому її називають співколивальною масою.

Зауважимо, що з деяким наближенням плоску діафрагму, що коливається як поршень в нескінченному акустичному екрані, можна наближено розглядати як пульсуючу куля, що випромінює сферичну хвилю. (Акустичним екраном називають практично звуконепроникну перегородку, що не бере участь в коливаннях. Часто такий екран називають стіною. Діафрагму розміщують в наскрізному отворі, зробленому для неї в екрані.)

Якщо таку поршневу діафрагму збуджувати на частотах, довжини хвиль яких значно більше розмірів діафрагми, то випромінювані звукові хвилі нічим не будуть відрізнятися від сферичних. Для довжин хвиль менших розмірів діафрагми закон випромінювання буде трохи складнішим, тому що при цьому звукові хвилі, які випромінюють різні ділянки діафрагми, будуть інтерферувати між собою. В результаті інтерференції в одних точках поля можливо підвищення рівня, а в інших - зменшення порівняно з рівнями, створюваними випромінювачами нульового порядку. Причому і те, і інше буде залежати від частоти коливань. За довжин хвиль, значно менших розмірів випромінювача, останній створює плоску хвилю. Нагадаємо, що на великій відстані від випромінювача акустичний опір сферичної хвилі практично дорівнює акустичному опору плоскої хвилі, тобто і за цим параметром на великій відстані від випромінювача сферична звукова хвиля перетворюється в плоску.

Тому для плоского поршневого випромінювача в нескінченному екрані безрозмірні коефіцієнти мають дещо інший вигляд (див. рис. 3.5, а, крива 2). Основна відмінність в тому, що перехід від квадратичної залежності до незалежності від частоти відбувається не плавно, а хвилеподібно, що пояснюється інтерференцією хвиль, випромінюваних окремими ділянками плоскої діафрагми.

Поршнева діафрагма, що коливається в екрані кінцевих розмірів, також може розглядатися як випромінювач нульового порядку, якщо випромінювані коливання матимуть довжину хвилі значно меншу ніж розміри екрану. При цьому мають місце ті ж застереження, що і для випадку нескінченного екрану щодо сумірності розмірів діафрагми і довжини хвилі.

Якщо ж довжина хвилі буде значно більше розмірів екрану, то мають справу з випромінювачем першого порядку - диполем, так як звукове поле буде створювати різниця дій випромінювань лицьової (фронтальної) і зворотної (тильної) сторін діафрагми з урахуванням різниці ходу звукових хвиль навколо екрану (рис. 3.5, в), тому для випромінювача без екрану залежність цих коефіцієнтів від частоти буде на низьких частотах інший, ніж з екраном (див. рис. 3.5, а, крива 4).

Внаслідок дифракції хвиль, що мають довжину більше розмірів діафрагми, відбувається взаємна компенсація випромінювань, так як тильна сторона

діафрагми випромінює хвилі протифазні з фронтальним випромінюванням (спостерігається ефект свого роду короткого замикання). Тому активний опір випромінювання близький до нуля і починає збільшуватися тільки, коли довжина хвилі починає перевершувати розміри випромінювача. На високих частотах, для яких довжина хвилі значно більше розмірів випромінювача, такий випромінювач за опорам випромінювання мало відрізняється від випромінювача нульового порядку.

Дифузор, що переміщається наперед, стискає повітря перед собою, одночасно в просторі за дифузором виникає розрядження повітря. В результаті передня і задня сторони дифузора гучномовця створюють звуковий тиск протилежної полярності. При додаванні протифазних звукових хвиль від передньої і задньої поверхонь дифузора результуючий звуковий тиск стає близьким до нуля. Це явище називають акустичним коротким замиканням (АКЗ). Воно може стати причиною погіршення роботи гучномовця на низьких частотах, якщо довжина звукової хвилі значно більше, ніж діаметр гучномовця. Для усунення цього явища застосовують акустичні екрани або корпуси, основним завданням яких є обмеження взаємодії між звуковими полями, утвореними передньою і задньою сторонами дифузора гучномовця.

ДИФУЗОРНИЙ ДИНАМІЧНИЙ ГУЧНОМОВЕЦЬ

Конструкція дифузорного електродинамічного гучномовця.

Дифузорний електродинамічний гучномовець складено з *магнітного кола* 3, 7, 8, 9 в робочому зазорі 4 якого знаходиться обмотка звукової котушки 2, і рухомої системи, яку становить дифузор 1 разом із звуковою котушкою 2 і підвісами у вигляді гофрованого комірця 6 і центрувальної шайби 11. Магнітне коло і рухома система гучномовця з'єднані з жорстким тримачем 5 (рис. 3.6).

Принцип дії дифузорного гучномовця такий.

У кільцевому повітряному зазорі магнітного кола, що складено з постійного магніту 3, верхнього 8 і нижнього 7 фланців, керна 9, що утворюють магнітопровід, в радіальному напрямку проходить постійний магнітний потік. У цьому зазорі зцентрована так звана звукова котушка 2, до якої за допомогою особливо гнучких провідників 10 прикладена змінна напруга звукової частоти. Звукова котушка, зазвичай, має парне число шарів обмотки, щоб її початок і кінець були з одного боку.

Струм, проходячи через котушку, взаємодіє з постійним магнітним потоком і створює електродинамічну силу, що призводить до коливань котушки і жорстко скріпленої з нею діафрагми (дифузора) 1. Сила визначають як

$$F = Bli,$$

де B - індукція в зазорі, l - довжина проводу, i - змінний струм в котушці.

Дифузор, який зазвичай паперовий, являє собою конус, що має в основі окружність або еліпс і пряму або криволінійну утворюючу.

За зовнішнім краєм дифузор має гофрований (верхній) підвіс 6. Призначення верхнього підвісу - забезпечити дифузору можливість коливатись поршнеподібно в широкому діапазоні частот і збільшити діапазон лінійної залежності сигналу - зміщення дифузора.

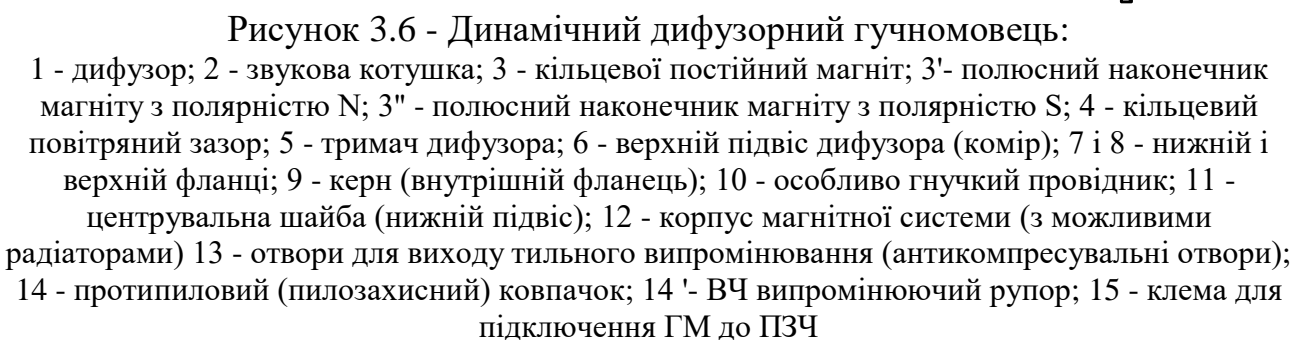
У своїй вершини дифузор, а разом з ним і звукова котушка утримуються в коаксіальному щодо повітряного зазору магнітного кола положенні за допомогою центрувальної шайби **11**. Ця шайба, також гофрована, охоплює по внутрішньому контуру вершину дифузора в місці прикріплення каркаса звукової котушки, а по зовнішньому - кріпиться до спеціального кільця або полиці, виконаної на дифузотримачі **5**. Останній є основою конструкції головки гучномовця.

Для потужних широкосмугових і низькочастотних головок дифузотримач виготовляють з силуміну, а для менш потужних штампують з листової сталі. Дифузотримач має вікна **13**, призначення яких - обмежити виникнення стоячих хвиль з тильного боку дифузора.

Вершина конуса дифузора заклеєна протипиловим ковпачком **14**, який можуть виготовляти як з акустично прозорого матеріалу, так і з акустично непрозорого, жорсткого. В останньому випадку такий ковпачок виконує також функцію додаткового випромінювача для високих частот і з метою виключення появи компресії повітря під ним при великих амплітудах коливань дифузора, в каркасі звукової котушки роблять антикомпресійні отвори.

Для більш ефективного відводу тепла від звукової котушки потужні головки гучномовців забезпечують радіатором, який надівають на магнітну систему і який має ребра. Такий радіатор виконує також функції магнітного екрану, що зменшує магнітний потік розсіювання, і захисної кришки, яка захищає крихкий постійний магніт від випадкових ушкоджень.

Протікання змінного струму через обмотку котушки викликає появу сили, яка приводить в рух рухому систему гучномовця, включно з самим дифузором. Дифузор є поршнеvim випромінювачем і має одну ступень свободи коливань (тільки в осьовому напрямку). Коливання дифузора передаються в навколишнє середовище (повітря), викликаючи хвилю, яка поширюється від гучномовця як акустична (звукова) хвиля. Електрична потужність, що підводять до гучномовця, в значній мірі витрачається в обмотці звукової котушки. Частина її витрачається на подолання тертя в рухомій системі, лише невелика частина випромінюється в навколишнє середовище у вигляді акустичної потужності.



Для електродинамічної системи коефіцієнт електромеханічного зв'язку визначають як

$$K = Bl,$$

де B - індукція постійного потоку в повітряному зазорі магнітного кола; l - довжина провідника котушки.

Коефіцієнт корисної дії η і стандартний звуковий тиск $p_{ст}$ (тиск на відстані 1 м від гучномовця за напрямком його робочої осі при підведенні потужності 0,1 Вт) для гучномовця, дифузор якого коливається в нескінченній стіні, можуть бути виражені відповідно:

$$\eta = \frac{\rho}{2\pi c \rho_e} \cdot \frac{BVS^2}{m^2};$$

$$p_{ст} = \frac{\rho}{2\pi m} \cdot \frac{0,1B^2V}{\rho_e};$$

Тут ρ - щільність повітря; S - площа дифузора; m - маса рухомої системи гучномовця; V - об'єм провідника звукової котушки; ρ_e - питомий електричний опір провідника звукової котушки.

Ці вирази справедливі в діапазоні частот, нижньою межею якого є резонансна частота, а верхньою - нижня межа поршневого діапазону, що дорівнює $f_{гр}$

$$f_{гр} = \frac{c}{\sqrt{2\pi S}}.$$

Нижче резонансної частоти звуковий тиск і ККД дуже сильно зменшуються. Вище $f_{гр}$ дифузор перестає коливатися як ціле і частини його коливаються з різними фазою і амплітудою. Тому звуковий тиск від нього то збільшується на тих частотах, де вся або більша частина поверхні дифузора і підвісу коливається синфазно, то зменшується, якщо частини поверхні дифузора і підвісу коливаються протифазно.

Визначимо особливості роботи дифузора ширококутної головки гучномовця на різних частотах.

В області низьких частот (НЧ) швидкість зміни фази сигналу в звуковій котушці менше швидкості поширення механічного збудження в матеріалі дифузора і останній поводить себе як єдине ціле, тобто коливається як поршень (рис. 3.7, а). На цих частотах частотна характеристика гучномовця має гладку форму, що свідчить про відсутність парціального збудження окремих ділянок дифузора (рис. 3.8).

Зазвичай, розробники головок гучномовців прагнуть розширити область поршневої дії дифузора в бік високих частот шляхом надання спеціальної форми утворюючої конуса. Для правильно сконструйованого целюлозного дифузора область поршневої дії може бути приблизно визначена як довжина хвилі звуку, що дорівнює довжині кола дифузора в основі конуса.

На середніх частотах (СЧ) швидкість зміни фази сигналу в звуковій котушці перевищує швидкість поширення механічного збудження в матеріалі дифузора і в ньому виникають хвилі вигину, дифузор вже не коливається як єдине ціле (рис. 3.7, б). На цих частотах показник загасання механічних коливань

в матеріалі дифузора ще недостатньо великий і коливання, досягаючи дифузотримача, відбиваються від нього і поширюються дифузором в зворотному напрямі до звукової котушки.

В результаті взаємодії прямих і відбитих коливань в дифузорі виникає явище стоячих хвиль, утворюються ділянки з інтенсивним протифазним випромінюванням.

При цьому на частотній характеристиці спостерігаються різкі нерегулярності (піки і провали), розмах яких може досягати у не оптимально сконструйованого дифузора десятка децибел (рис. 3.8).

На високих частотах (ВЧ) показник загасання механічних коливань в матеріалі дифузора зростає і стоячі хвилі не утворюються. Внаслідок послаблення інтенсивності механічних коливань, випромінювання високих частот відбувається переважно областю дифузора, що прилягає до звукової котушки (рис. 3.7, в). Тому для збільшення відтворення високих частот застосовують рупорки, що жорстко скріплені з рухомою системою головки гучномовця (рис. 3.6 , позиція 14').

Для зменшення нерівномірності частотної характеристики в масу для виготовлення дифузорів головок гучномовців вводять різні демпфувальні (такі, що збільшують загасання механічних коливань) присадки.

Що стосується нелінійних спотворень, то основними причинами їх є: *по-перше*, нелінійна залежність деформації (стиснення і розтягування) підвісу дифузора і центральної шайби від прикладеної сили; *по-друге*, неоднорідність магнітного поля в повітряному зазорі, оскільки магнітна індукція більша в середині зазору і менша у країв. А це, в свою чергу, призводить до того, що за однієї і тієї ж величини струму в звуковій котушці сила, що діє на неї, різна в залежності від того, чи вся котушка або частина її знаходиться всередині зазору.

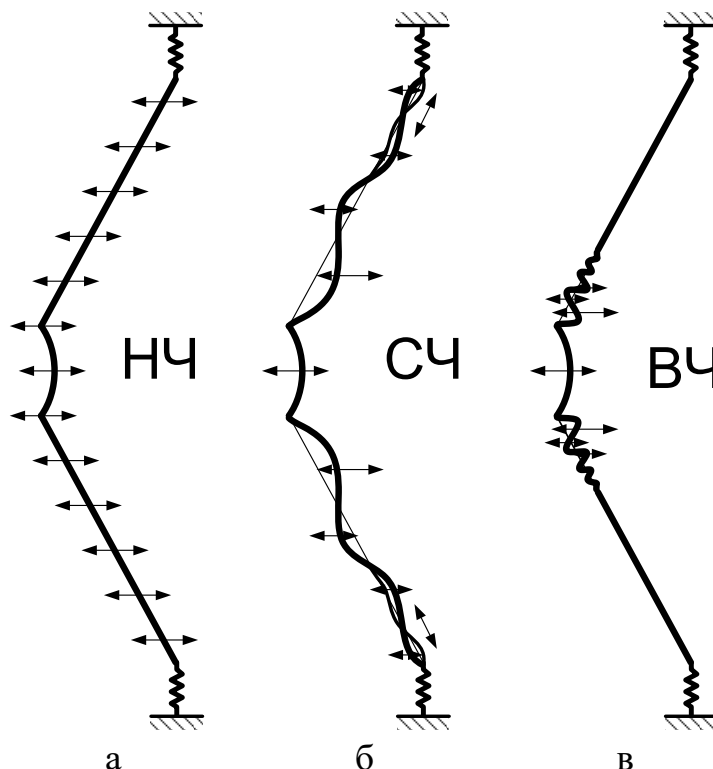


Рисунок 3.7 - Робота дифузора гучномовця на різних частотах

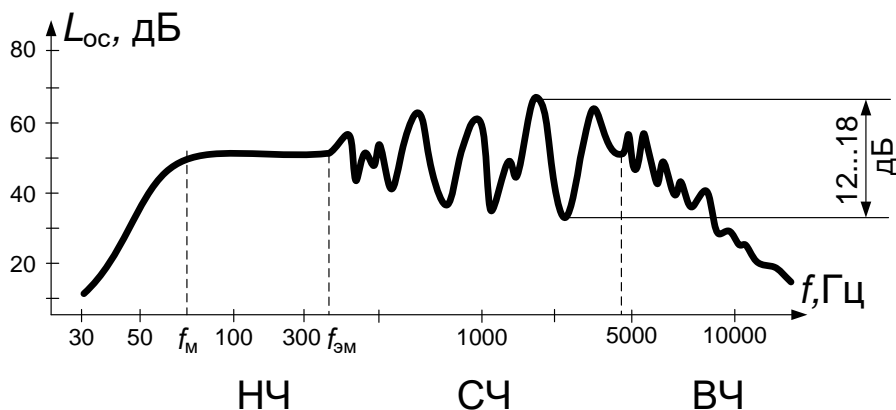


Рисунок 3.8 - Частотна характеристика широкосмугового гучномовця

У першому випадку витки котушки пронизуються повним магнітним потоком зазору, у другому - лише частиною його. Такі причини *нелінійних спотворень* гучномовців в області низьких частот, області основного резонансу рухомої системи, де вони досягають свого максимуму внаслідок максимальних амплітуд коливань дифузора. На середніх і високих частотах спотворення обумовлені іншими причинами, оскільки амплітуда коливань дифузора тут незначна і вимірюється десятими долями міліметра.

Однією з причин нелінійних спотворень є нелінійна взаємодія струму звукової котушки з металевими деталями магнітопроводу - керном і верхнім фланцем (див. рис. 3.6). У цих деталях, розташованих поблизу звукової котушки, виникають струми Фуко, які, в свою чергу, наводять ЕРС в звуковій котушці. Через властивості металу деталей магнітопроводу ця взаємодія має нелінійний характер. Методи боротьби з струмами Фуко відомі і можуть, наприклад, полягати в зменшенні електричної провідності частин деталей магнітопроводу, прилеглих до звукової котушки. Два інші види спотворень, які, строго кажучи, не можна називати нелінійними, пов'язані з властивостями матеріалу дифузора.

В існуючій методиці вимірювання нелінійних спотворень, коли обмежено випромінюваний гучномовцем основний тон і реєструють всі інші тони, такі спотворення кваліфікують як нелінійні.

Спотворення першого типу є наслідком збудження в матеріалі дифузора так званого структурного призвуку, що має більш-менш рівномірний спектр. Такі спотворення найбільш значні в недостатньо демпфованому дифузорі і виникають як відгук на механічне збудження, джерелом якого є звукова котушка. Цей вид спотворень надає звучанню гучномовця характерне тональне забарвлення, властиве гучномовцю даного типу.

Спотворення другого типу залежать від інтенсивності стоячих хвиль, що виникають в дифузорі, причина появи яких розглянута вище. Інтенсивні стоячі хвилі призводять до утворення ділянок дифузора, здатних випромінювати звук на власних частотах. Випромінювання ділянок дифузора також кваліфікують як нелінійні спотворення, і вони можуть в кілька разів перевищувати перший тип спотворень. Звідси стає очевидним шлях боротьби з такими спотвореннями, що полягає в зниженні інтенсивності відбитої від дифузороутримача складової механічних коливань і забезпечення режиму біжучої хвилі в дифузорі.

Дифузори високоякісних головок гучномовців, зазвичай, виконують з підклеєним верхнім підвісом і комірцем, що виготовляють окремо з матеріалу з більшим показником загасання механічних коливань. Такі головки мають більш високу вартість і менш технологічні у виробництві в порівнянні з масовими головками гучномовців, дифузор яких виготовляють разом з верхнім підвісом і комірцем.

Другий недолік головок з підклеєним верхнім підвісом - більш низька їх чутливість, обумовлена меншою радіальною жорсткістю підклеєного підвісу і, від цього виникненням небезпеки затирання звукової котушки в зазорі. Ця небезпека змушує розробників застосовувати більш широкий повітряний зазор з відповідним зниженням індукції магнітного поля. Причиною затирання звукової котушки є спіралевидна форма намотування її витків і пов'язана з нею тангенціальна складова сили Лоренца.

У низькочастотних головок гучномовців застосування особливо гнучкого верхнього підвісу дозволяє, крім послаблення відбитих від дифузотримача механічних коливань, отримувати більш низьку резонансну частоту. Для масових широкосмугових і середньо частотних головок гучномовців зниження інтенсивності відбитих від дифузотримача складових і забезпечення режиму біжучої хвилі може бути досягнуто нанесенням вібропоглинальної та незасихаючої мастики на частину верхнього підвісу, що не входить в динамічну масу дифузора. Дія нанесеного шару мастики, як і підклеєного підвісу, полягає в тому, що просочена мастикою ділянка верхнього підвісу значно змінює свої властивості, в результаті чого різко зростають втрати для механічних коливань, що поширюються в напрямку дифузотримача. Нанесення вібропоглинальної мастики дозволяє значно зменшити нерівномірність частотної характеристики в області середніх частот і знизити спотворення звуку головками гучномовців.

Для підвищення ефективності гучномовців замість котушок з мідного провідника виготовляють їх з алюмінієвого, що дозволяє зменшувати масу рухомої системи. Такі легкі котушки застосовують переважно для малогабаритних широкосмугових, а також для середньочастотних і високочастотних головок гучномовців. З метою подальшого підвищення ККД застосовують також намотування звукових котушок проводом не круглого, а прямокутного перетину. Збільшення ефективності обумовлено збільшенням об'єму провідника в зазорі магнітної системи.

Найбільш ефективним способом розширення діапазону відтворюваних частот є розділення його на частини так, щоб кожна з цих частин відтворювалася окремою головкою гучномовця, більшою за розмірами для низькочастотної області і меншою для високочастотної. Підключають ці головки через розділові смугові фільтри, що забезпечують передавання на дану головку напруги тільки тих частот, для відтворення яких вона призначена.

Вибір частот розділення, а також крутизни роздільного фільтра істотно впливають на якість звучання гучномовця. Тому при конструюванні акустичних систем суб'єктивна оцінка якості звучання є основним критерієм передавання їх у виробництво.

Визначимо фактори, що впливають на акустичну характеристику гучномовця p_1/v_m , де p_1 - звуковий тиск на відстані 1 м від робочого центру

по робочій осі у вільному полі; v_m - швидкість коливань діафрагми випромінювача.

Акустична потужність (потік енергії в звуковому полі)

$$P_a = \frac{4\pi p_1^2}{\rho c \Omega},$$

так як за визначенням $p_{oc} = p_1$, якщо $r = 1$ м.

У той же час випромінювана активна потужність

$$P_{a.випр} = v_m^2 R_{випр} = v_m^2 \rho c S K_{1випр}.$$

Оскільки вони повинні бути однаковими у пасивного середовища, то маємо

$$\frac{4\pi p_1^2}{\rho c \Omega} = v_m^2 \rho c S K_{1випр},$$

звідки для акустичної чутливості отримуємо

$$\frac{p_1}{v_m} = \rho c \sqrt{\frac{S \Omega K_{1випр}}{4\pi}},$$

де $K_{1випр}$ - безрозмірний коефіцієнт опору випромінювання; S - площа діафрагми.

Отже, акустична чутливість залежить від частоти через коефіцієнти опору випромінювання $K_{1випр}$ та осьової концентрації Ω . Перший зростає пропорційно квадрату частоти на нижніх частотах і постійний на середніх і високих частотах. Другий постійний на нижніх і росте на середніх і високих частотах із збільшенням частоти. Внаслідок цього акустична чутливість зростає пропорційно частоті в широкому діапазоні частот.

Визначимо характеристики спрямованості випромінювачів. Візьмемо два однакових сферичних випромінювача з відстанню між ними, що дорівнює d . Визначимо звуковий тиск, що створюють ці випромінювачі у віддаленій точці від них під різними кутами до осі (за вісь приймемо перпендикуляр до лінії, що з'єднує центри випромінювачів; лінія і перпендикуляр знаходяться в даній площині).

На осі звуковий тиск подвоїться.

Під кутом θ до осі різниця ходу між відстанями від випромінювачів до точки, що розглядається, $\Delta r = d \sin \theta$. Тому звукові тиски будуть складатися з урахуванням різниці ходу (тобто різниці фаз) між ними. Поки різниця ходу мала, сумарний звуковий тиск менше, ніж на осі, але більший, ніж звуковий тиск від одного випромінювача. Для різниці ходу, що дорівнює $0,5\lambda$, звуковий тиск дорівнюватиме нулю, при $\Delta r = \lambda$ буде дорівнювати осьовому, а при $\Delta r = 1,5\lambda$ він знову буде дорівнювати нулю тощо.

Якщо створюваний одним випромінювачем звуковий тиск

$$p_a = \frac{p_1}{r} \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right),$$

то створюваний іншим випромінювачем тиск

$$p_b = \frac{p_1}{r} \sin \omega \left[\left(t - \frac{r}{c} \right) - \Delta \varphi \right],$$

де $\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta r}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$ - різниця фаз між цими звуковими тисками, а амплітуда сумарного звукового тиску

$$p_{m\Sigma} = |p_a + p_b| = \frac{2p_1}{r} \cos \frac{\Delta \varphi}{2} = \frac{2p_1}{r} \cos \left[\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right].$$

Отже, характеристика спрямованості такого складеного випромінювача

$$R(\theta) = \frac{p_\theta}{p_{oc}} = \cos x,$$

де $x = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$, так як при $\theta=0$ $\Delta \varphi=0$ и $p_{oc}=2p_1/r$.

Тому для великих відстаней між випромінювачами в порівнянні з довжиною хвилі ($d > \lambda$) виходить багатопелюсткова характеристика спрямованості. Якщо ж довжина хвилі набагато більше відстані між випромінювачами ($\lambda \gg d$), то навіть під кутом 90° до осі випромінювача сумарний тиск буде лише трохи менше тиску на осі. В цьому випадку діаграма спрямованості близька до кола. Таким чином, впливає, що характеристика спрямованості визначається відношенням d/λ .

Для круглого поршневого випромінювача в нескінченному акустичному екрані характеристика спрямованості має вигляд

$$R(\theta) = \frac{2J_1(x)}{x},$$

де $x = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$, d - діаметр випромінювача; J_1 - функція Бесселя першого порядку.

На рис. 3.9 наведені діаграми спрямованості для цього випромінювача при різних відношеннях d/λ . Таким чином, у всіх випадках спрямованість визначають відношенням розмірів випромінювача до довжини хвилі: чим воно більше, тим більше коефіцієнт осьової концентрації. Тому для одного і того ж випромінювача спрямованість підвищується зі збільшенням частоти, а на одній і тій же частоті - зі збільшенням розмірів випромінювача.

Діаграма спрямованості поршневої діафрагми в екрані кінцевих розмірів для нижніх частот буде мати форму кривої $(1 - \sin \theta)$, так як в площині діафрагми (див. рис. 3.5, в) завжди буде повна компенсація випромінювання від обох сторін випромінювача, оскільки вони зсунуті за фазою на 180° .

Зі збільшенням частоти при довжинах хвиль, приблизно рівних і дещо менших розмірів екрану ($\lambda \leq d_e$), характеристика спрямованості дещо розширена, а при подальшому збільшенні частоти ($\lambda \ll d$) вона наближена до характеристики спрямованості поршневої діафрагми в нескінченному екрані, стаючи багатопелюстковою.

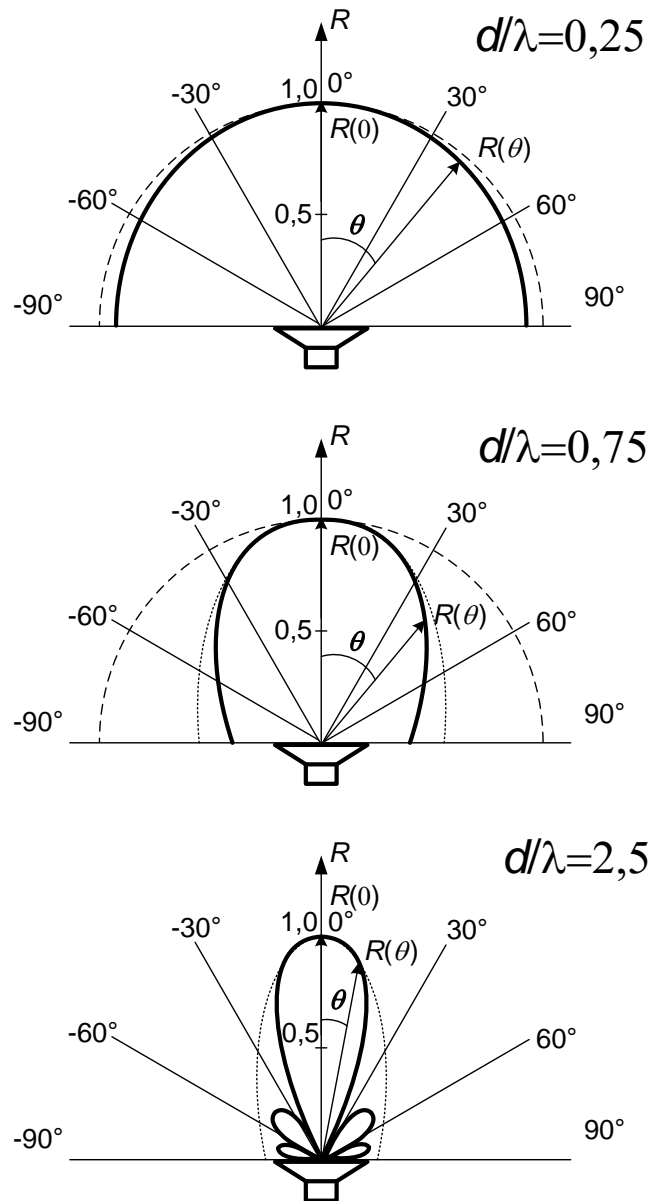


Рисунок 3.9 - Діаграми спрямованості круглого поршневого випромінювача в нескінченному екрані для різних співвідношень між діаметром випромінювача і довжиною хвилі

Слід також зупинитися на характеристиці ближнього поля поршневої діафрагми, так як воно відрізняється від поля сферичної хвилі. На невеликих відстанях від поршневого випромінювача, що знаходиться в нескінченному екрані, має місце інтерференція звукових хвиль, що випромінюють різні ділянки діафрагми, так як між ними виникає різниця ходу. Якщо довжина хвилі набагато більше розмірів діафрагми, ця різниця ходу невелика і всі звукові хвилі знаходяться майже в одній фазі, якщо ж довжина хвилі значно менше розмірів діафрагми, різниця ходу може виявитися навіть більше довжини хвилі. В результаті цього амплітуда звукового тиску в ближній зоні поршневого випромінювача змінюється при віддаленні від нього за складним законом з максимумами і мінімумами (в ряді точок тиск може дорівнювати нулю). І тільки на відстанях, що перевищують в декілька разів розміри діафрагми, закон зміни звукового тиску при віддаленні від випромінювача стає монотонним (гіперболічним).

3.3 АКУСТИЧНЕ ОФОРМЛЕННЯ ГУЧНОМОВЦІВ

Як акустичне оформлення гучномовців застосовують акустичні екрани кінцевих розмірів, відкритий корпус (відкритий ящик), закритий ящик, корпус з лабіринтом, корпус з фазоінвертором, корпус з пасивним випромінювачем, рупорні системи.

ПЛОСКИЙ ЕКРАН

Найбільш простий вид оформлення - плоский екран (рис. 3.10, а). Навіть при порівняно невеликих його розмірах відтворення низьких частот значно поліпшується. Разом з тим в області середніх, і особливо високих, частот екран вже не робить істотного впливу. Конструктивно екран рекомендовано виконувати у вигляді товстої дошки або фанери товщиною від 10 мм до 20 мм, в якій вирізано отвір по діаметру дифузотримача головки гучномовця. У цей отвір останній і вставляють. Екран виконують квадратної або краще прямокутної форми. Переважне відношення сторін прямокутника (ширини до висоти) 2:1 ... 3:1. Що стосується абсолютних розмірів екрану, бажано, щоб на нижній межі діапазону частот, який акустична система повинна відтворювати (за яку доцільно прийняти резонансну частоту головки гучномовця), еквівалентний діаметр екрану (діаметр кола, площа якого дорівнює площі екрану)

$$D = \frac{0,5\lambda_0}{Q},$$

де λ_0 - довжина звукової хвилі на нижній граничній частоті діапазону; Q - добротність головки гучномовця на резонансній частоті. Для таких розмірів екрану частотна характеристика виходить найбільш рівномірною. Якщо екран не може бути таких розмірів, то слід на нижній граничній частоті діапазону очікувати спад

$$N = 20 \lg \frac{D}{D_1},$$

де D - обчислений за вищенаведеною формулою діаметр; D_1 - фактичний діаметр.

Приклад. Резонансна частота головки гучномовця 85 Гц. Її добротність 2. Потрібно визначити спад на резонансній частоті, якщо з конструктивних міркувань фактично еквівалентний діаметр дорівнює 0,5 м.

Визначаємо бажаний діаметр екрану $D = 0,5 (343: 85 \cdot 2) = 1$ м. Для діаметра 0,5 м спад на нижній граничній частоті $N = 20 \lg (1:0,5) = 0,6$ дБ.

Розміщувати головку гучномовця рекомендують в разі прямокутного екрану в його центрі. Зсув від центру зменшує звуковий тиск і погіршує частотну характеристику. Для квадратних екранів деякий зсув місця встановлення головки кілька покращує частотну характеристику, хоча одночасно і зменшує звуковий тиск.

Тому настійно рекомендують виконувати це так, щоб передня площина дифузотримача (зазвичай, поверхня картонних секторів) була врівень з

передньою площиною екрану. В іншому випадку перед головкою утворюється циліндричне поглиблення (тип короткої труби). Стовп повітря, що знаходиться в ньому, може резонувати на низькі частоти і тим самим погіршувати частотну характеристику і якість звучання акустичної системи. Нарешті, слід врахувати, що головка гучномовця в екрані, по суті, є відкритою і тому може легко покриватися пилом. Щоб уникнути цього необхідно, спереду закривати головку будь-якою радіотканиною, утримуваною металевою рамкою, (круглої, еліптичної, прямокутної форми), що притягується до екрану шурупами. Слід при цьому звернути серйозну увагу, щоб тканина була натягнутою і ні в якому разі не резонувала, що можна виявити на око або на дотик, подаючи на гучномовець напругу низької частоти від звукового генератора. Позаду, з боку магнітних кіл, на головку гучномовця рекомендується надягати «спідничку», наприклад, з бязі.

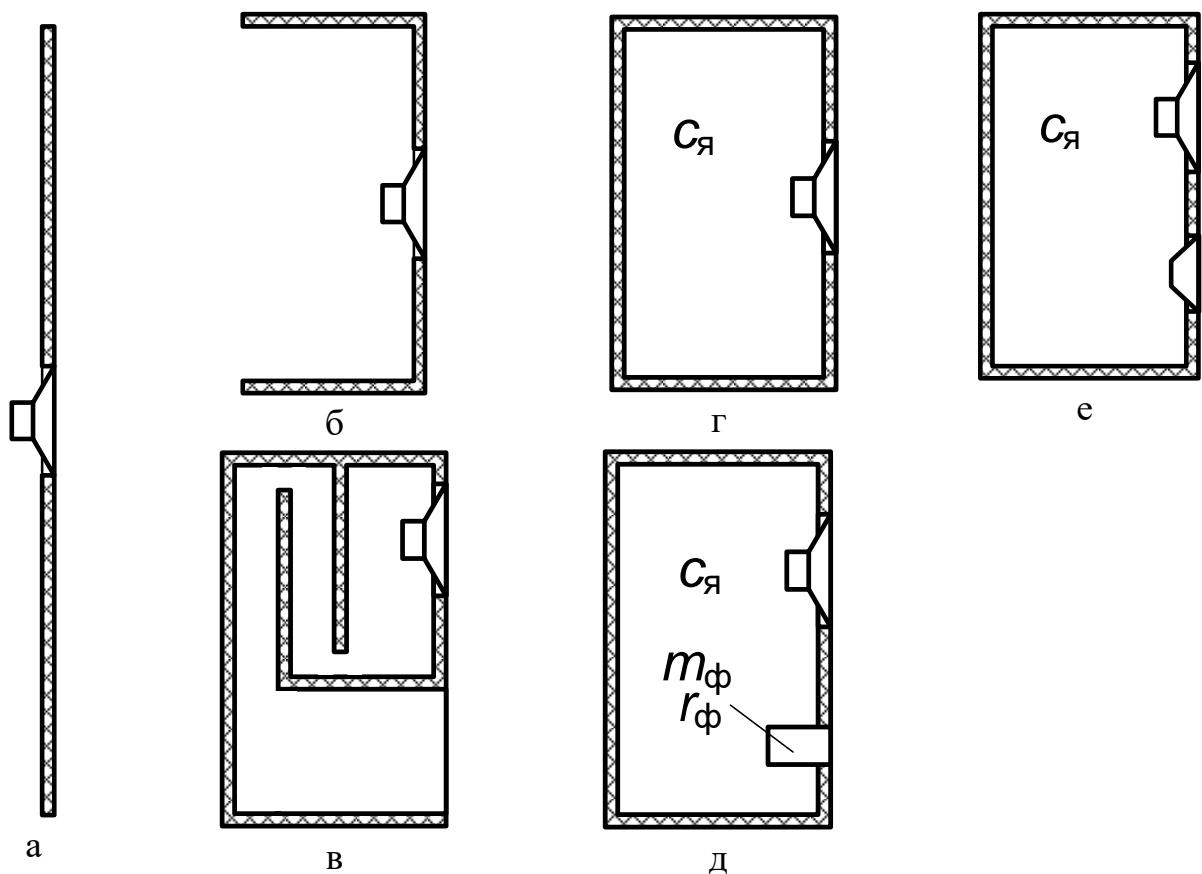


Рисунок 3.10 - Акустичне оформлення гучномовців

Відомі описи акустичних систем, де головку гучномовця вставляють в отвір в стіні кімнати, тобто стіна є екраном. Принципово таке конструктивне рішення вигідно, але при цьому не треба забувати, що звучання акустичної системи буде мати місце не тільки в тій кімнаті, в якій акустична система призначена працювати, але і в тій, куди виходить задня сторона головки гучномовця, що, звичайно, не завжди бажано. Якщо ж таке рішення можливо, то воно дає помітне поліпшення частотної характеристики і якість звучання, особливо на низьких частотах. Зрозуміло, що і в цьому випадку в силі всі вищенаведені рекомендації щодо врізання головки гучномовця тепер уже в стіну. Додатково мішечок позаду головки слід зробити побільше (наприклад, у вигляді півсфери з діаметром, що дорівнює діаметру головки) і набити його бавовняної ватою, що забезпечить від

небажаних резонансів. Природно, що таку півсферу треба якось замаскувати, щоб вона не псувала виду тієї кімнати, де вона розташована.

ВІДКРИТИЙ КОРПУС

Найпоширеніший вид акустичного оформлення - відкритий корпус (рис. 3.10, б). Він являє собою ящик, у якого задня стінка або повністю відсутня, або ж має ряд наскрізних отворів (наприклад, з перфорованого картону, пластмасова зі щілинами або отворами тощо). Головки встановлюють, зазвичай, на передній стінці ящика. Його внутрішній об'єм, як правило, використовують для розміщення деталей електричної схеми, наприклад, приймача або підсилювача.

Акустична дія відкритого оформлення подібна до дії екрану. Найбільший вплив на частотну характеристику акустичної системи з відкритим оформленням створюють передня стінка (на якій змонтовані головки гучномовців) і її розміри. Всупереч поширеній думці, бічні стінки відкритого оформлення впливають на характеристику акустичної системи мало. Таким чином важливий не внутрішній об'єм оформлення, а площа передньої стінки. Розміри її (еквівалентний діаметр передньої стінки) через вплив бічних можна робити на 25...40% менше розмірів екрану. Звичайно, якщо оформлення зробити дуже глибоким, то воно може діяти як труба, резонуючи на деяких частотах, тим більше низьких, чим більше довжина труби. Природно, це є небажаним, оскільки такі резонанси призводять до виникнення піків і провалів на частотній характеристиці акустичної системи.

Крім небажаності великої глибини відкритого оформлення, воно повинно задовольняти ще деяким вимогам. Перш за все, слід уникати будь-яких отворів і щілин в акустичному оформленні (за винятком отворів або щілин в задній стінці). Особливо небезпечні вони на передній стінці як причини акустичного «короткого замикання» і як причини, які можуть призвести до різкого погіршення відтворення низьких частот. Тому, зокрема, рекомендують встановлювати головки гучномовців на передній стінці з ущільненням у вигляді кільцевої прокладки з гуми, плівки тощо між дифузотримачем і передньою стінкою. Ущільненням можуть бути і картонні сектора, зазвичай, розташовані на дифузотримачі. Але тоді треба ущільнити щілини між ними. Головку треба притягувати до стінки гвинтами або шурупами, але не дуже сильно, щоб не покоробити дифузотримач і тим самим не викликати перекосу рухомої системи, що може призвести до нелінійних спотворень і стати причиною брязкоту.

Задня сторона головки гучномовця не повинна бути закрита, як це часто роблять, деталями схеми, не повинна «задохтися». Недотримання цієї вимоги призводить до зниження звукового тиску, що утворено акустичною системою. Можна рекомендувати, щоб деталі схеми не займали більше 30% внутрішнього об'єму оформлення. Розміри передньої стінки, як уже зазначалося в аналізі роботи акустичного екрану, бажано мати якомога більше. Обмеженням тут є тільки міркування зручності розміщення і користування. Що стосується місця встановлення головки на передній панелі і співвідношення ширини і висоти останньої, то тут рекомендації такі ж, як і в випадку плоского екрану. Площа перфорації або щілин в задній стінці повинна складати 10...20% всієї площі цієї стінки.

Конфігурація оформлення закритого типу дуже впливає на форму частотної характеристики на середніх частотах, викликаючи появу численних піків і провалів в разі невдалої форми.

Це добре видно з розгляду частотних характеристик (рис. 3.11) для різних конфігурацій оформлення: сферичного (кулі), куба, усіченої піраміди, паралелепіпеда. Ці характеристики зняті за умови, що швидкість коливань рухомої системи, головки є незмінною при зміні частоти (що практично, звичайно, не дотримується). Найбільш сприятливою формою є сфера.

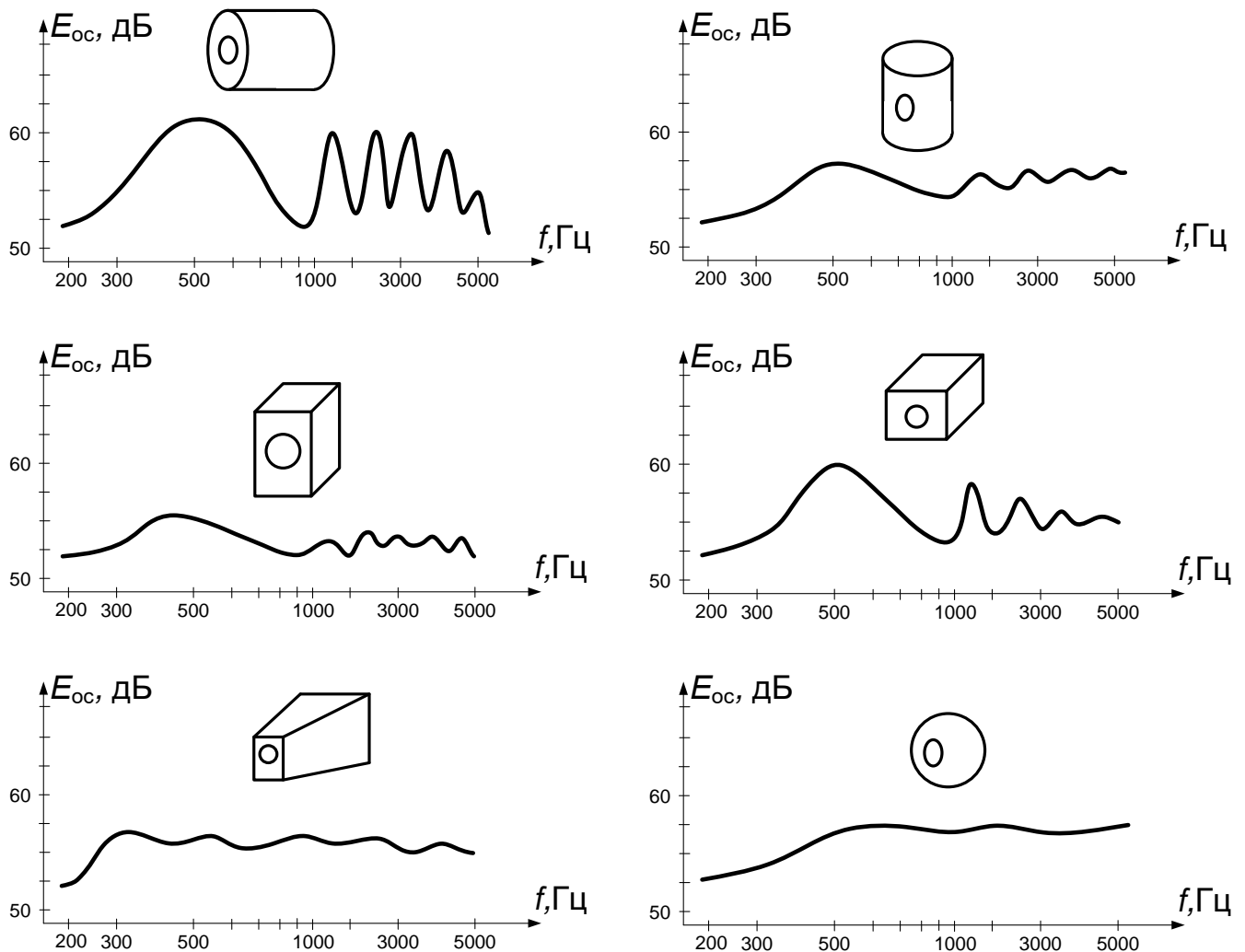


Рисунок 3.11- Залежність нерівномірності частотної характеристики гучномовців від акустичних оформлень різної форми та залежність нерівномірності частотної характеристики акустичної системи закритого типу від її добротності

Наведені характеристики слід мати на увазі при виборі конфігурації оформлення, хоча, виходячи з конструктивних міркувань, рідко можна застосувати сприятливу форму з числа зображених на рис. 3.11. З естетичних міркувань розміри оформлення у вигляді паралелепіпеда часто вибирають так, щоб розміри лицьової сторони (висота:ширина) і глибина ставилися один до одного як 1:0,55:0,41.

Матеріал оформлення повинен забезпечувати жорсткість стінок, особливо передньої. Найбільш відповідний матеріал - дерев'яні дошки, ДСП або фанера,

тим більше товста, чим більше розміри оформлення. Так, наприклад, для оформлення об'ємом від 5 л до 10 л можна використовувати дошку або фанеру товщиною 10...12 мм. Для оформлення об'ємом від 50 до 60 л слід робити стінки завтовшки до 20 мм. Передню панель оформлення, на якій кріплять головки гучномовців, у всіх випадках бажано брати не тонше 15...20 мм. Крім дерева і фанери, широко застосовують пластмасу.

КОРПУС З ЛАБІРИНТОМ

Для того, щоб уникнути акустичного «короткого замикання», свого часу було запропоновано акустичне оформлення з лабіринтом. Один з можливих варіантів його конструкції показано на рис. 3.10, в. Зображена акустична система складається з корпусу, на передній панелі якого укріплена головка. Задня сторона дифузора працює на створений декількома перегородками зигзагоподібний звукопровід - лабіринт. Другий кінець лабіринту закінчується вихідним отвором на одній зі стінок корпусу. Поперечний переріз лабіринту, зазвичай, прямокутний або круглий. Площа цього перетину має бути приблизно рівною площі дифузора.

Випрямлена довжина лабіринту повинна дорівнювати приблизно половині довжини хвилі на низькій граничній частоті акустичної системи, завдяки чому випромінювання з вихідного отвору лабіринту будуть збігатися за фазою з випромінюванням передньої сторони дифузора. Так, якщо акустична система повинна відтворювати звук з 50 Гц (довжина хвилі 6,8 м, половина довжини хвилі 3,4 м), то бажано, щоб випрямлена довжина лабіринту дорівнювала також 3,4 м. Звичайно, якщо лабіринт матиме більше колін, то конструктивна глибина корпусу акустичної системи буде відповідно менше. Внутрішні стінки лабіринту бажано покривати звукопоглинальним матеріалом, наприклад слабо набитими і простьобаними ватяними матами.

Однак конструкції акустичних систем з лабіринтом є досить громіздкими, внаслідок чого їх рідко застосовують, незважаючи на те, що від них можна отримати непогані результати.

КОРПУС З ПАСИВНИМ ВИПРОМІНЮВАЧЕМ

Корпус з пасивним випромінювачем передбачає застосування разом із традиційною динамічною головкою гучномовця додаткового «пасивного» дифузора, у якого відсутня котушка, що розміщена в магнітному полі постійного магніту (рис. 3.10, е). Завдяки «пасивному» випромінювачу зменшується вплив замкненого повітряного об'єму корпусу гучномовця, тобто, пружності повітря в об'ємі ящика, на коливання дифузора «активного» гучномовця. А також такий «пасивний» випромінювач покращує відтворення на нижніх частотах.

ЗАКРИТИЙ КОРПУС

Дуже велике поширення набули закриті системи (рис. 3.10, г). Перевага їх в тому, що задня поверхня дифузора не випромінює, і, таким чином, повністю відсутнє акустичне «коротке замикання».

Але закриті системи мають інший недолік. Він полягає в тому, що при коливаннях дифузора він повинен подолати додаткову пружність повітря в об'ємі ящика. Наявність цієї додаткової пружності призводить до того, що підвищується резонансна частота рухомої системи гучномовця, в результаті чого погіршено відтворення частот, що лежать нижче цієї частоти. Щоб резонансна частота все-таки не була надмірно високою, застосовують головки гучномовців з важкою рухомою системою, що дозволяє знизити резонанс, як це впливає з формули

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{m_0 c_0}} \cdot \sqrt{1 + \frac{c_0}{c}} = f_0 \sqrt{1 + \frac{V_0}{V}},$$

де f'_0 - резонансна частота системи; c_0 - гнучкість закріплення рухомої системи; c - гнучкість повітря в закритому об'ємі оформлення; m_0 - маса рухомої системи; V_0 - еквівалентний об'єм; f_0 - резонансна частота головки; V - об'єм оформлення.

Однак слід мати на увазі, що збільшення маси рухомої системи спричиняє зниження чутливості акустичної системи в цілому. Особливо невеликою є чутливість у так званих малогабаритних акустичних систем (МАС), пружність об'єму повітря всередині оформлення яких істотно більша, ніж пружність закріплення рухомої системи. Стандартний звуковий тиск для них визначають за формулою

$$p_{\text{ст}} = 2,65 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{f'_0 V}{Q}},$$

де f_0 - резонансна частота рухомої системи головки, встановленої в закриті оформлення об'ємом V ; Q - добротність системи на цій частоті.

Не рекомендують обирати добротність вище 0,7...1,0, так як рухома система виходить «роздемпфованою». Це означає, що при її збудженні, тобто при подачі на неї напруги музичної або мовної програми, вона окрім того, щоб коливатися в такт з цією напругою, буде коливатися і з частотою власних коливань, близькою до резонансної частоти. Для слухача це буде проявлятися в тому, що до звучання програми буде домішуватися звучання цієї частоти як свого роду «гудіння», «забруднення низів». Таким чином, будуть мати місце своєрідні спотворення, що носять назву перехідних. Ці спотворення обмежено, якщо добротність не перевищує одиниці.

Необхідно відзначити, що чим менша добротність, тим більше спад частотної характеристики на резонансній частоті. Так, для добротності 0,707 він становить 3 дБ, а для добротності 0,5 він становить уже 6 дБ (рис. 3.11). Природно, що такий спад характеристики, щоб уникнути погіршення відтворення низьких частот, необхідно коригувати в підсилювачі низької частоти. За наявності ж такої корекції система зі зменшеною добротністю

забезпечує істотно кращу якість звучання.

Конструктивно закриті системи треба виконувати так, щоб були відсутні будь-які щілини і отвори, наявність яких відразу ж може перетворити закриту систему в відкриту. Що стосується встановлення головок гучномовців і вибору матеріалів і товщини стінок, то тут необхідно дотримуватися тих вимог, які були зазначені для відкритих систем. Розміри оформлення рекомендують обрати щонайбільшими, проте немає сенсу робити об'єм його (в м³) істотно більше величини, яку визначають за формулою

$$V = \frac{\rho c^2 S^2}{23,2 f_0^2 m} = 6,5 \cdot 10^3 \frac{S^2}{f_0^2 m},$$

де f_0 - резонансна частота рухомої системи головки гучномовця без оформлення; m - маса рухомої системи в кг; S - площа дифузора, м².

Якщо об'єм оформлення буде більше, то це позначиться лише незначно на зниженні резонансної частоти акустичної системи в оформленні обраного об'єму. Що стосується мінімально припустимого внутрішнього об'єму, то його обирають виходячи з того, щоб добротність акустичної системи не перевищила припустиму величину добротності через підвищення резонансної частоти. Добротність акустичної системи визначається через добротність головки як

$$V = \frac{\rho c^2 S^2}{23,2 f_0^2 m} = 6,5 \cdot 10^3 \frac{S^2}{f_0^2 m},$$

звідси мінімально припустимий внутрішній об'єм закритого оформлення

$$V = \frac{V_0}{\frac{Q_1^2}{Q^2} - 1}.$$

Приклад. Нехай треба знайти мінімальний об'єм закритого оформлення для головки гучномовця з резонансною частотою 40 Гц, добротністю 0,5 і еквівалентним об'ємом 50 л за припустимої максимальної добротності акустичної системи 1,0:

$$V = 50 / [(1 / 0,5)^2 - 1] = 50/3 = 17 \text{ л.}$$

При цьому резонансна частота системи

$$f'_0 = f_0 \sqrt{1 + \frac{50}{17}} = 80 \text{ Гц.}$$

Спад характеристики (див. рис. 3.11) на цій частоті буде 2 дБ. Природно, може статися, що при такому об'ємі оформлення отримана резонансна частота буде занадто високою. Тоді потрібно збільшувати об'єм до отримання потрібного значення резонансної частоти. Для того щоб зменшити резонансні явища всередині оформлення, можна рекомендувати оббивку його звукопоглинальним матеріалом. Найбільш доступним матеріалом є бавовняна вата, яку слід рівномірно розподілити по внутрішньому об'ємі оформлення з розрахунку приблизно 15 г на 1 л внутрішнього обсягу. Якщо матеріал (вата) розміщують тільки на задній стінці ящика з внутрішньої сторони, то достатньо застосовувати 2...3 г його на 1 л внутрішнього об'єму. Щоб уберегти рухливу систему від потрапляння до неї волокон вати, рекомендують головку перед її

встановленням укласти в чохол, наприклад з бязі.

Механічну рухому систему, що складена з дифузора зі звуковою котушкою і кріпленням, можна вважати, зокрема, на низьких і середніх частотах як єдине ціле, тобто простою коливальною системою, що складена з маси всієї рухомої системи m , включно з співколивальною масою $m_{\text{вн}}$; трьох гнучкостей, з'єднаних в аналоговій схемі послідовно [гнучкість підвісу c_1 , гнучкість центрувальної шайби c_2 (рис. 3.6) і гнучкість повітря в ящику (див. рис. 3.10, г) $c_я$]; трьох активних опорів (тертя котушки об повітря в зазорі r_1 , механічні втрати в дифузорі, центрувальній шайбі і підвісі r_2 , а також опір випромінювання $R_{\text{випр}}$).

Механічний опір в цьому випадку має вигляд

$$z_{\text{м}} = (r_1 + r_2 + r_{\text{випр}}) + j\omega(m_{\text{д}} + m_{\text{вн}}) + \frac{1}{j\omega} \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_я} \right) =$$

$$= r_{\text{м}} + j\omega m + \frac{1}{j\omega c_{\text{м}}}.$$

Щоб дифузор не вигинався як мембрана, йому надають відповідну форму. Для створення необхідної жорсткості дифузору найчастіше надають форму усіченого конуса з круговою або еліптичною основою. Оскільки на високих частотах дифузор коливається як мембрана, тобто з вигином його поверхні: хвилі вигину рухаються від центру до периферії і назад, створюючи стоячі хвилі по радіусам дифузора. Для великих діаметрів дифузора (близько 25 см) ці коливання починають з'являтися на частотах вище 1500 Гц, для менших розмірів - відповідно на більш високих частотах. Це призводить до того, що розміри поверхні, що випромінює, маси і гнучкості рухомої системи різко змінюються навіть за невеликої зміни частоти вимушених коливань дифузора.

Тому механічну коливальну систему треба розглядати окремо: для низьких і середніх частот як просту систему з зосередженими постійними параметрами і для високих - як систему з розподіленими параметрами.

Вхідний електричний опір гучномовця визначають сумою власного опору котушки $Z_{\text{Е}}$ і внесеного $Z_{\text{вн}}$, тобто

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\text{е}} + Z_{\text{вн}}.$$

Власний опір динамічного гучномовця складено з активного опору котушки $R_{\text{е}}$ і її невеликої індуктивності $L_{\text{е}}$. Внесений опір визначають повним механічним опором $z_{\text{м}}$ і коефіцієнтом електромеханічного зв'язку $K_{\text{зв}} = Bl$.

На рис. 3.12, а наведено схему електричного аналогу для даного випадку, за якої внесений опір

$$Z_{\text{вн}} = \frac{B^2 l^2}{z_{\text{м}}} = \frac{B^2 l^2}{r_{\text{м}} + j\omega m + \frac{1}{j\omega c_{\text{м}}}}.$$

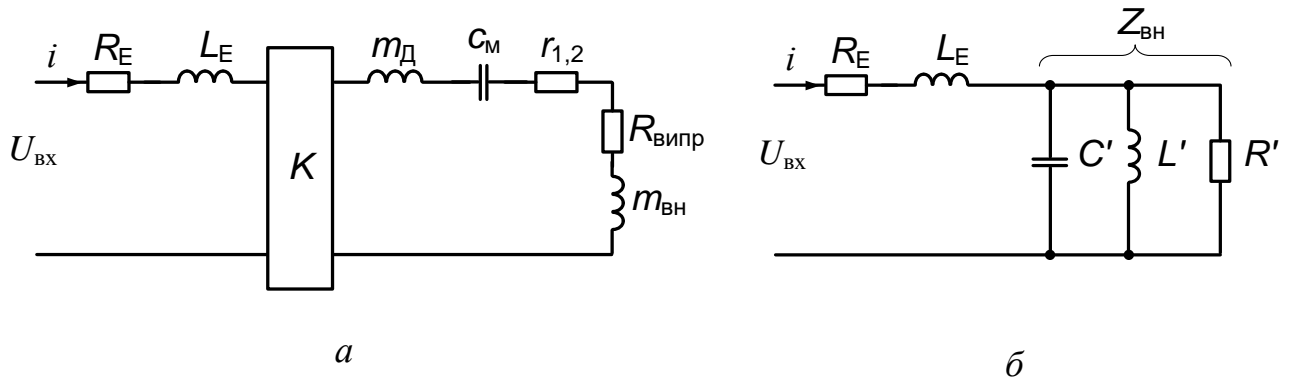


Рисунок 3.12 - Схеми вхідного опору гучномовця:
а) електрична з аналогом механічної схемою;
б) еквівалентна електрична схема

Цей опір можна представити як електричний еквівалент. Наведемо вираз для внесеної електричної провідності:

$$\frac{1}{z_{\text{BH}}} = Y_{\text{BH}} = \frac{r_{\text{м}}}{B^2 l^2} + \frac{j\omega m}{B^2 l^2} + \frac{1}{j\omega C_{\text{м}} B^2 l^2}.$$

Відповідно до характеру частотної залежності зробимо наступні заміни:

$$R' = \frac{B^2 l^2}{r_{\text{м}}};$$

$$C' = \frac{m}{B^2 l^2};$$

$$L' = C_{\text{м}} B^2 l^2.$$

Після цього отримаємо, що загальна провідність еквівалентного кола дорівнює сумі провідностей

$$Y_{\text{BH}} = \frac{1}{R'} + j\omega C' + \frac{1}{j\omega L'}.$$

Це означає, що всі три електричні провідності повинні бути включені паралельно (рис. 3.12, б).

Цікаво відзначити, що в еквівалентній схемі інерційний опір має ємнісний еквівалент, а опір гнучкості - індуктивний (не можна плутати цей еквівалент з аналогом).

Механічна коливальна система має резонансну частоту

$$\omega_{\text{м}} = \frac{1}{\sqrt{m c_{\text{м}}}} = \frac{1}{\sqrt{C' L'}}.$$

Цю частоту називають частотою механічного резонансу. З цього слідує, що і еквівалентний контур з L' і C' має ту ж резонансну частоту. На цій частоті вхідний опір гучномовця має максимум, що визначають сумою активних опорів котушки і внесеного активного опору

$$R_{\text{вх.макс}} = R_e + \frac{B^2 l^2}{r_M}.$$

На частотах нижче частоти механічного резонансу вхідний опір падає до активного опору котушки, а на частотах вище (в діапазоні частот 150...400 Гц) досягає мінімуму, в основному зумовленого послідовним резонансом: індуктивністю L_e і еквівалентною ємністю C' у внесеному опорі.

Відповідну частоту резонансу

$$\omega_{\text{ем}} \approx \frac{1}{\sqrt{C'L_e}}.$$

називають частотою електромеханічного резонансу. Вище частоти $\omega_{\text{ем}}$ вхідний опір визначають тільки власним опором котушки Z_e і тому він зростає зі збільшенням частоти через індуктивний характер повного опору.

На рис. 3.13 наведена типова частотна залежність вхідного опору.

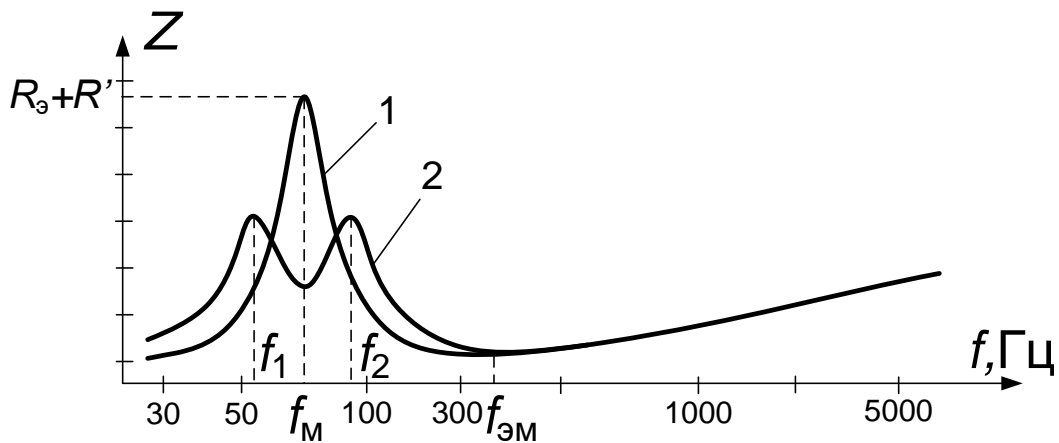


Рисунок 3.13 - Частотна залежність модуля вхідного опору гучномовця
1 - закритий ящик без інвертора; 2 - ящик з інвертором

Дифузорний гучномовець, зазвичай, встановлюють в ящику або плоскому екрані, що називають акустичним оформленням. Ящики застосовують з відкритою і закритою задньою стінкою (див. рис. 3.10 б, г). Іноді задню стінку роблять перфорованою, затягнутою тканиною або без неї.

Для ящика з закритою задньою стінкою дифузор є випромінювачем нульового порядку з тими застереженнями, які були зроблені для поршневих випромінювачів в нескінченному екрані. Відмітимо, що випромінювання лицьової сторони дифузора в разі закритої задньої стінки відбувається у всю сферу, а не в її половину, як це виходить у разі поршневої діафрагми, що знаходиться в плоскому нескінченному екрані. Тому залежність опору випромінювання, наведена на рис. 3.2, а (крива 3), дещо відрізняється від характеристики для нескінченного екрана (крива 2).

Слід ще вказати на те, що об'єм ящика з закритою задньою стінкою на низьких частотах являє собою пружнісний опір, а на середніх - є резонатором. Власні частоти таких резонаторів зазвичай лежать в області 500...1000 Гц. (Гнучкість повітря в ящику додається до пружності механічної коливальної

системи і призводить до підвищення власної частоти рухомої системи гучномовця.)

Щоб уникнути впливу резонансів об'єму ящика, стінки його покривають всередині звукопоглинальним матеріалом. Однак повністю видалити вплив резонансів не вдається, особливо на нижніх частотах, так як коефіцієнти звукопоглинання тонких шарів матеріалу малі, а товсті шари не входять в ящик.

Крім того, самі стінки ящика також можуть коливатися під дією звукових хвиль, випромінюваних дифузором, що призводить до ускладнення картини звукового поля, створюваного дифузорним гучномовцем. При цьому на визначених частотах стінки ящика резонують і тим самим вносять великі частотно-залежні зміни в опір випромінювання гучномовця.

Для ящика з відкритою задньою стінкою (а також для гучномовців без оформлення) дифузор є випромінювачем першого порядку, якщо довжина хвилі значно більше розмірів ящика (або самого гучномовця, якщо його використовують без оформлення), тобто на низьких частотах. Відповідно до цього на низьких частотах при $d/\lambda \ll 1$ випромінювання близько до нуля (див. рис. Г2, а, крива 4).

Зі збільшенням частоти, коли довжина хвилі стає приблизно дорівнювати подвоєній довжині шляху звукових променів навколо стінок ящика від лицьової сторони дифузора до тильної, спостерігають додавання випромінювань, а при подвоєнні частоти - повна компенсація їх (випромінювання від тильної сторони діафрагми має протилежний знак по відношенню до фронтального).

При подальшому підвищенні частоти знову спостерігають додавання коливань. На більш високих частотах ефект дифракції стає вже невеликим і випромінювання буде відбуватися незалежно у фронтальну і тильну півсфери, тобто випромінювач можна вважати випромінювачем нульового порядку. Щоб не було стрімкої компенсації випромінювання на довжині хвилі, що дорівнює довжині шляху навколо екрану, гучномовець розташовують несиметрично відносно передньої стінки ящика.

Якщо замість суцільної задньої стінки застосована, наприклад, перфорована стінка з певним акустичним опором, звукові хвилі, які випромінює зворотна (тильна) сторона діафрагми, додатково зсуваються за фазою. В результаті цього компенсація фронтального і тильного випромінювань виходить на більш низькій частоті, ніж при відкритій задній стінці.

Визначимо чутливість гучномовця.

Акустична чутливість гучномовця

$$\frac{p_1}{v_m} = \rho c \sqrt{\frac{\Omega S_m K_{1\text{випр}}}{4\pi}},$$
$$\text{де } \Omega = \frac{P_{\text{ос с}}^2}{P_{\text{ос нс}}^2} = \frac{P_{\text{ос}}^2}{P_{\theta \text{ ср}}^2} - \text{коефіцієнт осьової концентрації;}$$

$K_{\text{випр}} = \frac{\omega^2 R^2}{\omega^2 R^2 + c^2}$ - безрозмірний коефіцієнт опору випромінювання;

R - радіус випромінювача; c - швидкість звуку.

$$\frac{\omega R}{c} = \frac{2\pi R}{\lambda}.$$

Механічна чутливість гучномовця

$$\frac{v_m}{F} = \frac{1}{z_m} = \frac{1}{\sqrt{r_m^2 + (\omega m - \frac{1}{\omega C_m})^2}}.$$

Для електродинамічного гучномовця коефіцієнт електромеханічного зв'язку

$$\frac{F}{i} = Bl = K_{\text{зв}}$$

а електрична характеристика

$$\frac{i}{U} = \frac{1}{Z_m} = \frac{1}{|Z_e + Z_{\text{вн}}|} = \frac{1}{|Z_e + \frac{B^2 l^2}{z_m}|}.$$

З цих виразів знаходимо осьову чутливість гучномовця за напругою:

$$E_{\text{ос}} = \frac{p_1}{U} = \frac{\rho c Bl}{z_m Z_{\text{вн}}} \sqrt{\frac{\Omega S_m K_{\text{випр}}}{4\pi}} = \frac{\rho c Bl}{|z_m Z_e + B^2 l^2|} \sqrt{\frac{\Omega S_m K_{\text{випр}}}{4\pi}}.$$

Для середніх частот і низьких, вище частоти механічного резонансу, ця чутливість

$$E_{\text{сч}} = \frac{p_1}{U} = \frac{\rho c Bl}{\omega m R_e} \sqrt{\frac{\Omega S_m K_{\text{випр}}}{4\pi}}.$$

так як $z_e = R_e$, $z_m = \omega m$, $B^2 l^2 < \omega m R_e$.

Як бачимо, цю чутливість визначено масою рухомої системи, індукцією в зазорі і акустичною чутливістю. Остання для випромінювачів нульового порядку майже пропорційна частоті, тому чутливість гучномовця на середніх частотах не залежить від частоти.

Якщо електричний опір задано, то чутливість гучномовця можна підвищити для одночасного збільшення довжини і поперечного перерізу проводу, тобто шляхом збільшення об'єму провідника. А це спричинить збільшення зазору, яке знизить індукцію в ньому. Її можна збільшити, застосувавши більш ефективні магнітні матеріали і збільшивши об'єм, що також має свої межі.

Таким чином наявне протиріччя, розв'язати яке можна компромісним шляхом. У всякому разі, слід зменшувати масу другорядних деталей і вдало використовувати об'єм зазору. Для цього застосовують провід з прямокутним перетином та безкаркасну намотку котушки.

На частоті механічного резонансу ω_m $r_m = z_m$ и $Z_e = R_e$, а за умови узгодження опорів механічного та електричного кіл опір $R_e = B^2 l^2 / r_m$.

Оскільки на низьких частотах коефіцієнт осової концентрації Ω близький до одиниці, то на частоті механічного резонансу чутливість гучномовця

$$E_{p.ч.} = \frac{p_1}{U} = \frac{\rho c B l}{2 r_m R_e} \sqrt{\frac{S K_{1 \text{ випр}}}{4 \pi}}.$$

Отже, відношення чутливості на середній і резонансній частотах

$$\frac{E_{сч}}{E_{p.ч.}} = \frac{2 r_m}{\omega_m m} = \frac{2}{D},$$

$$\frac{K_{1 \text{ випр}}(\omega) \Omega(\omega)}{K_{1 \text{ випр}}(\omega_m)} = \frac{\omega^2}{\omega_m^2},$$

де D - добротність всієї коливальної системи. При відповідному підборі добротності механічної системи ($D = 2 \dots 1$) можна отримати чутливість на резонансній частоті, близьку до чутливості на середніх частотах. За такої умови частотна характеристика гучномовця матиме невелику нерівномірність в діапазоні від частоти механічного резонансу до частот, на яких дифузор починає коливатися як мембрана. Нижче частоти механічного резонансу чутливість стрімко падає (Іноді роблять добротність $D = 0,6$, що відповідає критично-аперіодичному режиму коливальної системи гучномовця - відсутності вільних коливань цієї системи. Однак, в цьому випадку нерівномірність частотної характеристики на резонансній частоті доходить до -12 дБ. Але у зв'язку з плавністю спаду характеристики в бік низьких частот можна легко компенсувати цей спад в електричному колі).

Оскільки чутливість залежить від маси рухомої системи, знижувати частоту механічного резонансу можна тільки збільшенням гнучкості системи. Частоту знижують до тих пір, поки рухома система не почне втрачати стійкість і не виникне небезпека появи перекосів котушки і зчеплення її з стінками зазору. Практично для широкосмугових гучномовців не вдається знизити частоту механічного резонансу нижче 60...70 Гц. Отже, нижня межа передаваного діапазону частот не буде нижче 50...60 Гц, а в більшості випадків вона не нижче 70...80 Гц.

Частоту, вище якої дифузор коливається як мембрана, можна підвищити (в разі збереження його маси і тих же розмірів) наданням йому більшої жорсткості. Це досягають потовщенням стінок дифузора зі зменшенням їх товщини до периферії. Одночасно з цим зменшують щільність матеріалу, наприклад, роблять його пористим (без наскрізних пір). Застосовують різноманітне просочення матеріалу дифузора.

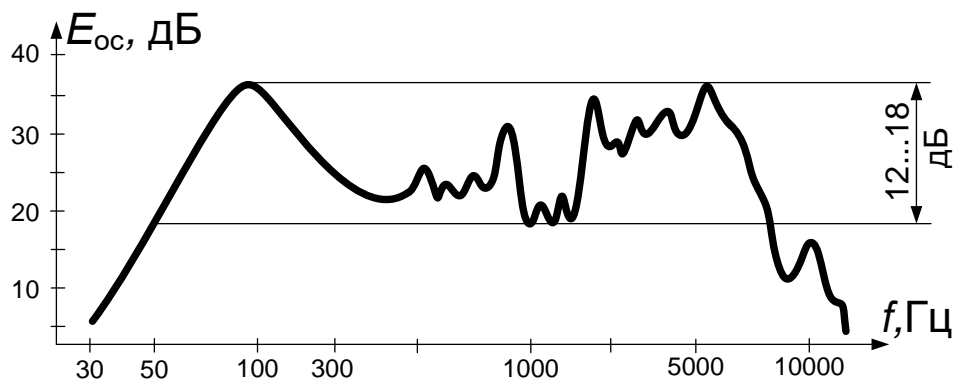


Рисунок 3.14 - Частотна характеристика дифузорового гучномовця 4ГД8Е в екрані

В діапазоні частот, в якому дифузор коливається як мембрана, частотна характеристика виходить дуже мінливою (див. рис. 3.14). Але так як слух людини через досить широкі критичні смуги слуху згладжує частотну характеристику, то не всі піки і провали на слух помітні.

Частотна залежність осьової чутливості гучномовця (без урахування різких піків і провалів) близька до рівномірної до частот приблизно 6000...7000 Гц (див. в смугі 12-18 дБ за рис. 3.14). Це пояснюють тим, що зі збільшенням частоти перестає коливатися зовнішня частина дифузора і маса його різко зменшується. Особливо це помітно в разі використання дифузора з криволінійною формою утворюючої. Правда, при цьому зменшується і випромінювальна поверхня, але в меншому ступені. Вище 7000...8000 Гц частотна характеристика стрімко падає. Все це стосується нескладених гучномовців, розрахованих для роботи в широкому частотному діапазоні.

Підвищити верхню межу частотного діапазону до 10...12 кГц можна, наприклад, кільцевим гофруванням дифузора. При цьому зі збільшенням частоти перестають коливатися один за іншим зовнішні ділянки дифузора, одночасно зменшується можливість коливання його як мембрани. Інший спосіб - застосування додаткового конуса, який вставляють усередині дифузора (рис. 3.6). У цьому випадку на високих частотах основний дифузор перестає працювати через відносно гнучке з'єднання його з звуковою котушкою, а в роботу вступає малий дифузор, досить жорсткий і легкий.

Чутливість гучномовця на високих частотах можна підвищити, зменшуючи індуктивність звукової котушки, наприклад, за допомогою струмів Фуко, що зменшує її електричний опір і призводить до збільшення струму. Для цього на керн надягають насадку у вигляді мідного ковпачка з розрізом.

КОРПУС З ФАЗОІНВЕРТОРОМ

Прагнення отримати досить хороше відтворення низьких частот для помірного об'єму акустичного оформлення досить добре досягається в так званих фазоінверсних системах (закордонна назва бас-рефлекс). Застосування фазоінвертора підвищує чутливість гучномовця на нижніх частотах. Конструкція фазоінверсних систем досить проста.

Фазоінвертор (рис. 3.13, а) являє собою ящик *1* (в якому розташований гучномовець *2*) з отвором *3* в передній стінці. Тобто у корпусі закритої системи робиться щілина або отвір, в який може бути вставлена трубка. Через цей отвір виходить назвні випромінювання з тильної сторони випромінювача. На рис. 3.15, б приведена електрична схема аналога фазоінвертора. На ній m_d , c_m , $r_{1,2}$ - маса, гнучкість і активний опір рухомої системи головки гучномовця; $c_{я}$ - гнучкість повітря усередині корпусу (ящика) системи; m_{ϕ} , r_{ϕ} - маса і активний опір (в тому числі опір випромінювання) щілини, отвору або трубки фазоінвертора.

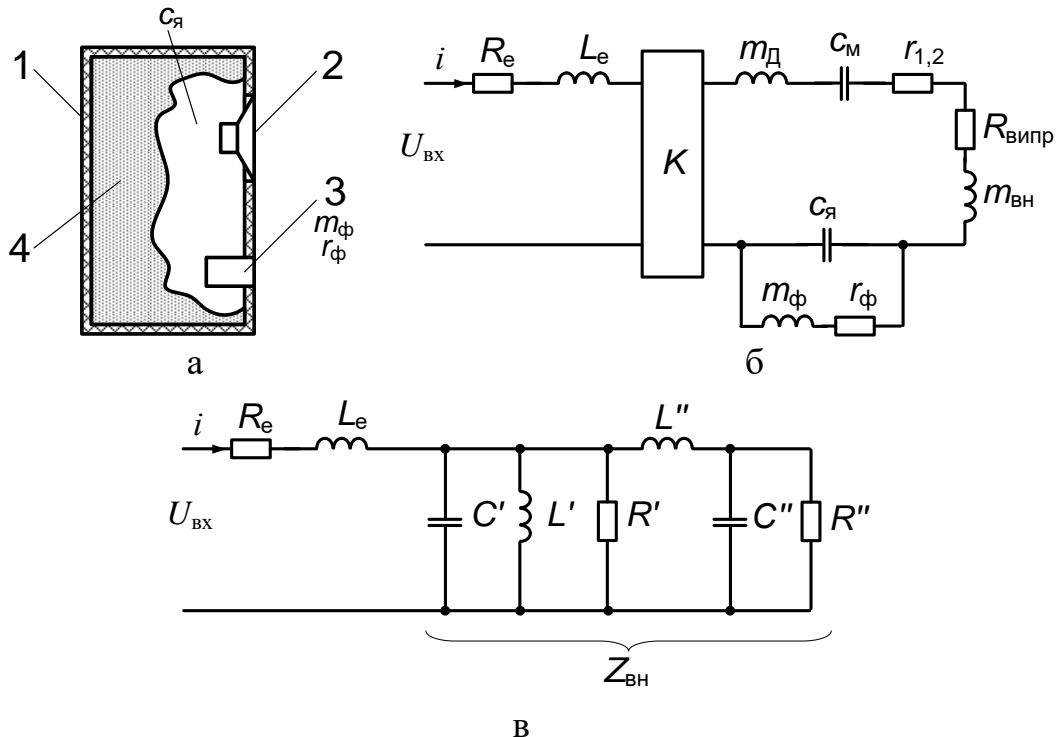


Рисунок 3.15 - Гучномовець з фазоінвертором (а) (1 - ящик; 2 - гучномовець; 3 - отвір інвертора; 4 - внутрішня оббивка поглинальним матеріалом) та схема вхідного опору гучномовця з інвертором: а) електрична з аналогами механічної; б) еквівалентна схема

Пружність об'єму повітря в оформленні резонує на якійсь частоті з масою повітря в отворі або трубці. Цю частоту називають резонансною частотою фазоінвертора. Таким чином, акустичну систему в цілому складено наче з двох резонансних систем - рухомої системи гучномовця і оформлення з отвором.

При цьому рухома система гучномовця має властивості електричного послідовного резонансного контуру, а фазоінвертор - паралельного.

В разі вірно обраного співвідношення резонансних частот цих систем відтворення низьких частот значно поліпшується в порівнянні з закритими і відкритими акустичними системами з таким же об'ємом оформлення. Це пояснюється тим, що на частотах вище резонансної частоти фазоінвертора швидкість коливань частот в отворі (або трубці) має більш сприятливий зсув за фазою щодо швидкості коливань тильної сторони дифузора головки гучномовця,

ніж у разі відкритої системи, коли від передньої і задньої сторін її приходять коливання, зсунуті за фазою на 180° відносно один одного.

Отвір і об'єм ящика являють собою резонатор з паралельним з'єднанням гнучкості ящика $c_{\text{я}}$ з масою $m_{\text{ф}}$ і активним опором $r_{\text{ф}}$ (рис. 3.13, б), відповідних отвору (ця маса дорівнює масі повітря в отворі з додаванням співколивальної маси навколишнього середовища; активний опір включає в себе втрати на тертя об стінки отвору і його опір випромінювання).

Частоту такого резонатора підбирають рівній частоті механічного резонансу рухомої системи $\omega_{\text{м}}$ (без урахування гнучкості об'єму повітря в ящику $c_{\text{я}}$, яка вже входить в систему резонатора).

В результаті отримуємо механічну систему, що складається з двох резонансних систем (рис. 3.13, б) з послідовним резонансом ($m_{\text{д}} + m_{\text{вн}}$; $C_{1,2}$; ($r_{1,2} + R_{\text{випр}}$) і паралельним $c_{\text{я}}$, $m_{\text{ф}}$, $r_{\text{ф}}$ (останній має вид фільтра-пробки).

На рис. 3.15, б дана еквівалентна схема, приведена до електричного входу гучномовця. Порівняння цієї схеми зі схемою рис. 3.12, б ілюструє, що з'явилося додаткове ланка

$$R_{\text{ф}}'' = \frac{B^2 l^2}{r_{\text{ф}}};$$

$$C'' = \frac{m_{\text{ф}}}{B^2 l^2};$$

$$L'' = c_{\text{я}} B^2 l^2.$$

Тому вхідний опір гучномовця матиме провал на частоті механічного резонансу і два максимуми нижче і вище його (див. рис. 3.13, крива 2).

Нижній резонанс виникає на частоті $f_1 < f_{\text{м}}$ і його частоту визначено гнучкістю рухомої системи $c_{1,2}$ і масою $m_{\text{ф}}$, верхній на частоті $f_2 > f_{\text{м}}$ - всією масою рухомої системи m і гнучкістю об'єму повітря в ящику $c_{\text{я}}$.

Оскільки резонансна частота рухомої системи $f_{\text{м}}$ знизилась, тому що в неї вже не входить гнучкість $c_{\text{я}}$, то нижня межа переданого діапазону тим самим теж знизилася. Поява резонансу на частоті f_1 , що лежить нижче частоти резонансу рухомої системи, ще дещо зсуває нижню границю відтворюваного діапазону. Крім того, на частоті резонансу f_2 швидкість коливань в колі $m_{\text{ф}}$, $r_{\text{ф}}$, тобто в отворі ящика, буде знаходитися у фазі зі швидкістю коливань лицьовій поверхні дифузора, оскільки інвертор повертає фазу на 180° , а фази хвиль випромінюваних лицьової і тильної поверхнями дифузора відрізняються на 180° . В результаті цього тильне випромінювання дифузора додається до лицьового випромінювання.

На частоті механічного резонансу інвертор повертає фазу тільки на 90° , тому тильне випромінювання додається до лицьового в меншій мірі, а на частоті f_1 вже ніякої добавки немає. Тому фазоінвертор підвищує чутливість гучномовця переважно на частотах вище частоти механічного резонансу.

Незважаючи на очевидні переваги акустичних систем з фазоінвертором, дуже часто такі системи, виготовлені навіть досвідченими фахівцями, не дають

очікуваних від них результатів. Причина цього в тому, що для отримання необхідного ефекту фазоінвертор повинен бути правильно розрахований і налаштований. Для правильного вибору співвідношень параметрів фазоінвертора використовують криві відношення резонансної частоти фазоінвертора f_v до резонансної частоти головки гучномовця f_0 , крива добротності головки гучномовця на резонансній частоті Q і крива відношення частоти f_3 , на якій виникає спад до низьких частот частотної характеристики 3 дБ, до резонансної частоти гучномовця f_0 . Всі ці величини залежать від відношення V_0/V еквівалентного об'єму головки гучномовця до об'єму оформлення.

В разі використання фазоінвертора з трубкою максимальне значення діаметра трубки обмежено тим, що визначена за формулою її довжина повинна бути не більше 1/12 довжини хвилі на резонансній частоті. Крім того, трубка своїм іншим кінцем не повинна упиратися в стінку, протилежну тій, на якій вона укріплена. Цей кінець має бути віддалений від стінки не менше ніж на 4 см. Трубка (якщо її застосовано) конструктивно може бути виконана найпростіше з картону або пресшпона, накрученого з клеєм на якийсь круглий стрижень в кілька шарів. Можна зробити трубку і квадратною так, щоб площа квадрата дорівнювала площі кола обраного діаметра. У цьому випадку її можна зібрати з товстої фанери також на клею і врізати в оформлення.

Розміри трубки визначають за формулою

$$\frac{4l + 3,4d}{d^2} = \frac{c^2}{4\pi V f_0^2},$$

де V - об'єм акустичного оформлення гучномовця, c - швидкість звуку, 343 м/с; d - діаметр отвору або трубки; l - довжина трубки (або товщина стінки у разі отвору).

В разі розрахунку за цією формулою не можна забувати, що всі величини слід підставляти в одиницях одних і тих же систем. Наприклад, все в лінійних, квадратних, кубічних метрах або сантиметрах, об'єм відповідно в кубічних метрах або кубічних сантиметрах, швидкість звуку в метрах в секунду або сантиметрах в секунду. Як видно з формули, діаметр трубки (або отвору) і її довжина можуть перебувати в різних співвідношеннях, задовольнивши при цьому написаній формулі. Якщо виконують не трубку, а отвір, то рекомендують робити його діаметр за можливістю більшим і ніяк не менше ніж половина діаметра дифузора.

Характеристика спрямованості одиночних дифузорних гучномовців цілком визначена характеристиками випромінювачів поршневого типу нульового або першого порядку залежно від розмірів екрану або ящика, в якому встановлено гучномовець. Коефіцієнт концентрації великих дифузорних гучномовців не перевищує чотирьох на частотах від 1000 Гц до 2000 Гц. Зауважимо для порівняння, що для мініатюрних гучномовців (з діаметром дифузора не більше 10 см) такий коефіцієнт концентрації виходить тільки на частотах близько 4000 Гц.

Дифузорні гучномовці випускають на потужність від 0,1 до 25 Вт і більше. Гучномовці, які застосовують для безпосередньої дії, мають потужність до 3 Вт.

У дифузорних гучномовців ККД малий через неузгодженість опору механічної системи і акустичного опору повітря. Недостатньо високий і ККД електромеханічного перетворювача, оскільки у нього малий коефіцієнт електромеханічного зв'язку. В результаті цього дифузорні гучномовці мають стандартний звуковий тиск в межах 0,2...0,3 Па. Для коефіцієнта концентрації, що дорівнює чотирьом, отримуємо ККД - $\eta = 0,3(0,2...0,3)^2 100/4 = 0,3...0,7\%$.

Нелінійні спотворення у дифузорних гучномовцях в основному виникають внаслідок нелінійності механічної системи в центрувальній шайбі і підвісі дифузора і через нерівномірний розподіл індукції в зазорі. Перша причина обумовлена тим, що за великих амплітуд коливань дифузора величина згину центрувальної шайби і підвісу дифузора нелінійно зв'язана з силою, що діє на них. Друга причина також важлива за великих амплітуд коливань дифузора, оскільки при цьому звукова котушка виходить за межі рівномірного магнітного поля в зазорі.

За однакової випромінювальної потужності амплітуда швидкості коливань дифузора зростає зі зменшенням частоти до резонансу, близько частоти якого вона досягає максимального значення. Річ у тому, що випромінювану потужність визначено добутком квадрата швидкості коливань на опір випромінювання ($P_{\text{а.випр}} = v_m^2 Z_{\text{випр}}$). Останній зменшується зі зменшенням частоти. А оскільки амплітуди швидкості коливань v_m і зміщення x_m пов'язані співвідношенням $v_m = \omega x_m$, то амплітуда коливань звукової котушки стрімко зростає зі зменшенням частоти аж до резонансу. Нижче частоти резонансу амплітуда стрімко зменшується.

Коефіцієнт нелінійних спотворень на частотах близько 100 Гц доходить до 10 і більше відсотків. Для його зменшення застосовують центрувальні шайби, що мають складну конфігурацію і виконані зі спеціальних матеріалів, гофровані підвіси, а також полюсні наконечники такої форми, за якої виникає більш рівномірне поле в зазорі. Для малопотужних гучномовців висоту звукової котушки беруть більше висоти зазору, внаслідок чого число пересічних силових ліній не залежить від амплітуди коливань, що, правда, призводить до зниження ККД, але для таких гучномовців це не грає ролі.

Слід ще сказати про можливість появи субгармонійних спотворень, в результаті яких виникають складові з частотами, що дорівнюють половині частоти коливань дифузора, тобто субгармоніки. Ці субгармоніки створено в тих випадках, коли утворююча дифузора прямолінійна, тобто коли дифузор має конічну форму. Щоб зменшити можливість виникнення субгармонік, утворюючій дифузора надають криволінійну форму.

Внутрішній опір гучномовців звичайно складає декілька ом. Для його узгодження з опором приймача, трансляційної лінії тощо застосовують трансформатори. В цій ситуації вхідний опір гучномовців з трансформатором визначають номінальною напругою джерела потужності і номінальною потужністю гучномовця $Z_{\text{вх}} = U_{\text{ном}}^2 / P_{\text{ном}}$.

До дифузорних гучномовців електродинамічного типу можна віднести також і електродинамічні стрічкові гучномовці. В наш час перебувають в стані розроблення стрічкові гучномовці високочастотного типу, розраховані на

діапазон частот від 2 кГц до 30 кГц. За конструкцією вони схожі з стрічковим мікрофоном, але мають велику поверхню випромінювача (стрічки).

3.4 РУПОРНІ ВИПРОМІНЮВАЧІ

Основним недоліком гучномовців безпосереднього випромінювання є їх надзвичайно низький ККД. Причиною цього є неузгодженість опорів механічної системи і навколишнього середовища. Для збільшення опору випромінювання необхідно було б збільшувати розміри випромінювача, але це тягне за собою збільшення механічного опору маси випромінювача і не дає виграшу в ККД.

Оскільки дифузор виконує дві функції, а саме функцію перетворення механічних коливань в акустичні та функцію випромінювання цих коливань в навколишнє середовища, то вирішити таке протиріччя можна тільки шляхом розділення цих функцій. Це розділення функцій здійснюють в рупорних гучномовцях. Рупор забезпечує також узгодження опорів механічної системи і навколишнього середовища.

Рупором називають трубу зі змінним перетином. Вхідний отвір випромінювального рупора (горло) менше, ніж вихідний (гирло). Вихідний отвір є випромінювачем, а вхідний - служить навантаженням для механічної системи. Таким чином, випромінювач може бути зроблений як завгодно великим, а механічна система - невеликою і тому легкою.

Рупори застосовують з різним законом зміни їх поперечного перерізу. Найбільш поширені рупори - експоненційні, рідше - конічні. Для експоненційного рупора поперечний переріз змінюється за наступним законом:

$$S_x = S_0 e^{\beta x},$$

де β - показник розширення рупора; S_0 - вхідний поперечний переріз; x - відстань від входу рупора (рис. 3.16).

Спочатку розглянемо нескінченний рупор, тобто рупор, у якого немає відбиття хвиль від вихідного кінця. Для такого рупора вхідний опір

$$z_p = R_p + jX_p = \rho c S_0 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{кр}}{\omega} \right)^2} + j \frac{\omega_{кр}}{\omega} \right],$$

R_p - активна складова вхідного опору рупора; X_p - реактивна складова його; c -

швидкість звуку; $\frac{\omega_{кр}}{2\pi} = \frac{\beta c}{4\pi} = f_{кр}$ - так звана критична частота рупора.

З огляду частотної залежності вхідного опору експоненціального рупора нескінченної довжини (рис. 3.16, криві 1, 2) впливає, що активна складова опору рупора для частот, нижче критичної, дорівнює нулю, присутня тільки реактивна складова. Це свідчить про те, що рупор на цих частотах не випромінює енергію в навколишній простір, а запасає і повертає її після закінчення вимушених коливань у вигляді своїх вільних коливань в механічну систему. Реактивна складова має інерційний характер, тобто є співколивальною масою, яку внесено в механічну систему. Ця складова на середніх і високих

частотах мізерно мала, а на низьких, але вище критичної частоти в більшості випадків нею можна знехтувати без внесення помітної помилки, тому надалі не будемо її враховувати.

Вище критичної частоти активна складова швидко зростає до опору, що дорівнює опору плоскої хвилі, і далі залишається постійною. Закон її зміни нагадує частотну характеристику фільтра ВЧ. Для порівняння на рис. 3.16 (крива 4) наведено частотну залежність вхідного опору кінцевого рупора, що має значно менш крутий підйом до високих частот. В цьому і є недолік кінцевого рупора в порівнянні з експоненціальним.

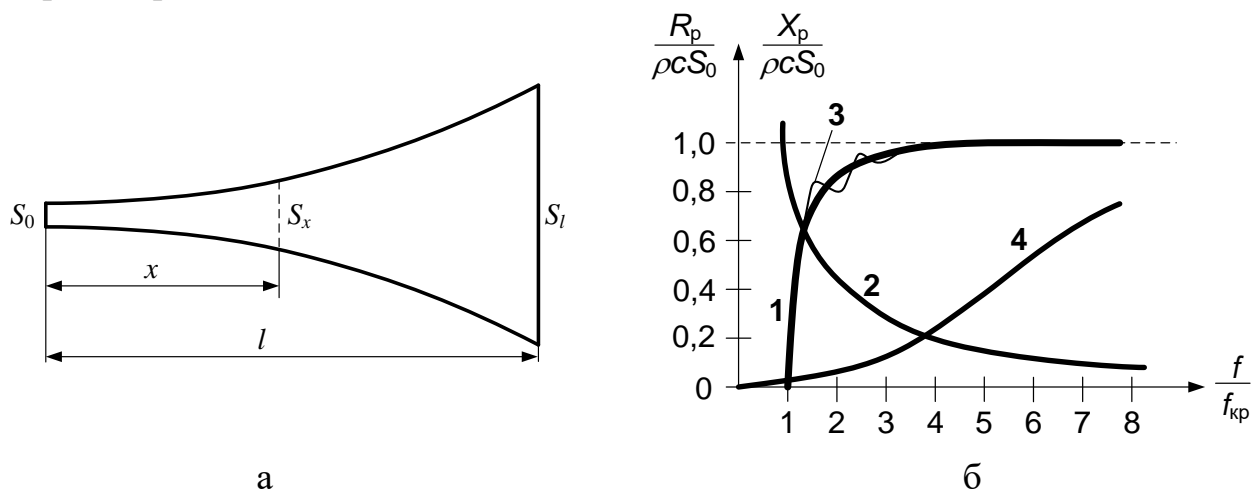


Рисунок 3.16 - Експоненціальний рупор

ескіз рупора і залежність активної і реактивної складових вхідного опору рупора від частоти (1 - активна складова для експоненціального рупора нескінченної довжини; 2 - реактивна складова для нього ж; 3 - активна складова для нього ж у випадку кінцевої довжини; 4 - активна складова вхідного опору для кінцевого рупора)

Критична частота експоненціального рупора тим вище, чим крутіше він розходить, тому для усунення нижньої межі частотного діапазону вниз необхідно застосовувати рупори з пологим розходженням.

У рупорах кінцевої довжини через неузгодженість опорів рупора з навколишнім середовищем виникають відбиття звукових хвиль від його гирла. У рупорі виникають стоячі хвилі. А через це частотна характеристика вхідного опору рупора стає хвилеподібною (див. рис. 3.16, крива 3), однак, тільки на низьких частотах, на яких фронт випромінюваної хвилі близький до сферичної. Для середніх і високих частот довжини випромінюваних хвиль виявляються більше розмірів випромінюючого отвору рупора, і тому фронт хвилі в кінці рупора стає плоским і залишається таким після виходу з нього. Внаслідок цього не відбувається відбиттів хвиль від кінця рупора. Так як розміри вихідного отвору для широкосмугових гучномовців беруть в межах 0,6...1 м, то таке явище спостерігається, вже починаючи з частоти 300...500 Гц ($d = \lambda$).

Вихідний отвір рупора визначає і спрямованість його випромінювання. На рис. 6.3 було наведено характеристики спрямованості для поршневої діафрагми в нескінченному екрані за різних співвідношеннях d/λ . Виявляється, що ці співвідношення майже повністю придатні і для рупорного випромінювача, якщо

довжини випромінюваних хвиль менше розмірів вихідного отвору. В цьому випадку в отворі рупора утворюється хвиля по фронту, близька до плоскої. Отже, при розмірах гирла рупора в 0,6...1 м для частот вище 300...500 Гц можна користуватися цими співвідношеннями. На низьких частотах випромінювання з отвору рупора буде менш спрямованим, ніж у поршневої діафрагми, так як через відсутність екрана виникає розходження хвиль у куті 4π замість 2π .

Довжину рупора визначають відношенням площ вхідного і вихідного отворів рупора:

$$l = \frac{c}{4\pi f_{\text{кр}}} \ln \frac{S_l}{S_0}.$$

Якщо треба мати гостру спрямованість і низьку нижню межу переданого частотного діапазону, слід збільшувати вихідний отвір рупора і зменшувати критичну частоту, внаслідок чого приходить брати рупор великої довжини. Для цього рупор часто згортають або складають (рис. 3.17, б). Порівняйте ці дані з даними для духових музичних інструментів: чим нижче регістр інструмента, тим довше його рупор.

Коефіцієнт концентрації рупорів залежить від частоти. На середніх частотах він доходить до 30...50. Така висока концентрація створює великий осьовий звуковий тиск, рупор як би підсилює звук. Насправді він лише концентрує звукову енергію в певному напрямку. Крім того, внаслідок узгодженості опорів рупора і навколишнього середовища, з одного боку, і рупора і механічної коливальної системи, з іншого, випромінювана потужність при використанні рупора більше, ніж без нього. Найменша залежність коефіцієнта концентрації від частоти виходить, якщо вибрати параметри експоненціального рупора з круглим вихідним отвором, що задовольняє наступній умові:

$$\frac{\lambda_{\text{кр}}}{d} = 3 \dots 3,5,$$

де $\lambda_{\text{кр}} = \frac{c}{f_{\text{кр}}} = \frac{4\pi}{\beta}$, так як $f_{\text{кр}} = \frac{\beta c}{2}$, d - діаметр вихідного отвору рупора. У цьому випадку коефіцієнт концентрації $\Omega = 25$ в широкому діапазоні частот.

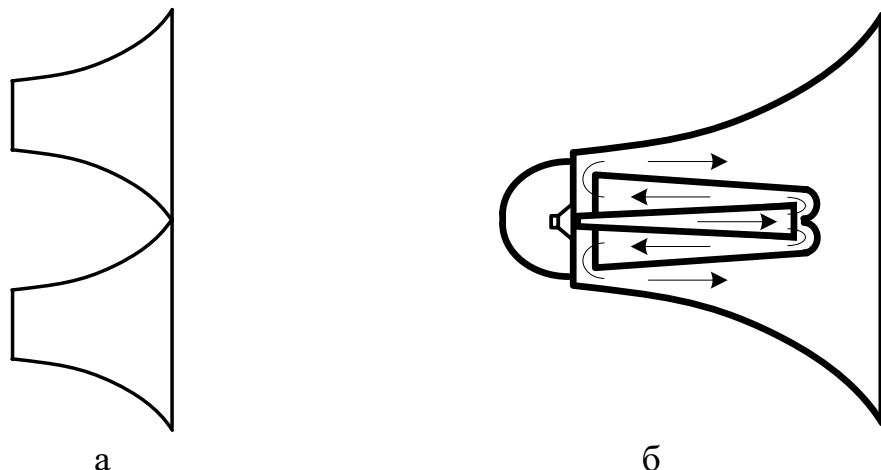


Рисунок 3.17 - Види рупорів: а) здвоєний рупор; б) складений рупор

Великого поширення набули рупори з прямокутним вихідним отвором. Такі рупори мають різну спрямованість у взаємно перпендикулярних площинах, що проходять через вісь рупора, поздовжню і поперечну осі вихідного отвору. Спрямованість в кожній з цих площин (поздовжній і поперечній) визначено відношенням розмірів вихідного отвору з одного боку і довжиною хвилі з другого. Часто застосовують здвоєні круглі рупори, тобто два окремих рупора із суміжними вихідними отворами (див. рис. 3.17, а). Такі рупори можуть наближено вважати рупорами з прямокутним вихідним отвором, що має поперечні розміри d і $2d$, де d - діаметр вихідного отвору рупора.

У тих випадках, коли треба мати однакове випромінювання в межах тілесного кута близько $\pi/2$, що не залежить від частоти, застосовують секціоновані рупори.

Як висновок слід зазначати, що для концентрації або розсіювання звукових хвиль застосовують акустичні лінзи, засновані на заломленні звукових променів в разі переходу з одного середовища в інше з різними швидкостями поширення (наприклад, швидкість поширення звукових хвиль в пористих матеріалах або в решітках і жалюзі з пластин відрізняється від швидкості поширення у відкритому просторі).

Крім частотних спотворень, рупор вносить нелінійні спотворення, обумовлені великою величиною і різкою зміною амплітуди звукового тиску в межах однієї довжини хвилі в горлі рупора.

РУПОРНИЙ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ ГУЧНОМОВЕЦЬ

Рупорні гучномовці мають два конструктивних варіанта: вузькогорлі і широкогорлі. Площа вхідного отвору рупора в вузькогорлих гучномовцях в кілька разів менше площі поршневої діафрагми, в широкогорлих - вони або однакові або близькі один до одного.

У вузькогорлих рупорних гучномовцях, схематичне з'єднання головки якого з рупором дано на рис. 3.18, а, застосований понижуючий акустичний трансформатор для узгодження вхідного опору рупора з механічним опором діафрагми. Як такий трансформатор використана передрупорна камера I з коефіцієнтом трансформації, що дорівнює відношенню площі діафрагми S_d і вхідного отвору рупора S_0 , тобто $n = \frac{S_d}{S_0}$. Внаслідок цього вхідний опір експоненційного рупора, зведений до діафрагми, буде збільшено в n^2 раз і складе

$$z_p = \frac{\rho c S_0 S_d^2}{S_0^2} = \frac{\rho c S_d^2}{S_0}.$$

Визначимо умови отримання рівномірної частотної характеристики рупорного гучномовця. Вхідний опір експоненціального рупора практично не залежить від частоти для частот вище подвоєної критичної. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку $K_{CB} = Bl$ - постійна величина. Електрична

характеристика гучномовця $\frac{i}{U} = \frac{1}{Z_{\text{вх}}}$ слабо залежить від частоти, як і у дифузорного гучномовця. Акустична чутливість

$$\frac{p_1}{v_0} = \rho c \sqrt{\frac{\Omega S_0 K_{1 \text{ випр}}}{4\pi}},$$

де p_1 - звуковий тиск, виміряний у віддаленій зоні і перерахований до відстані 1 м від гучномовця; v_0 - швидкість коливань в горлі рупора.

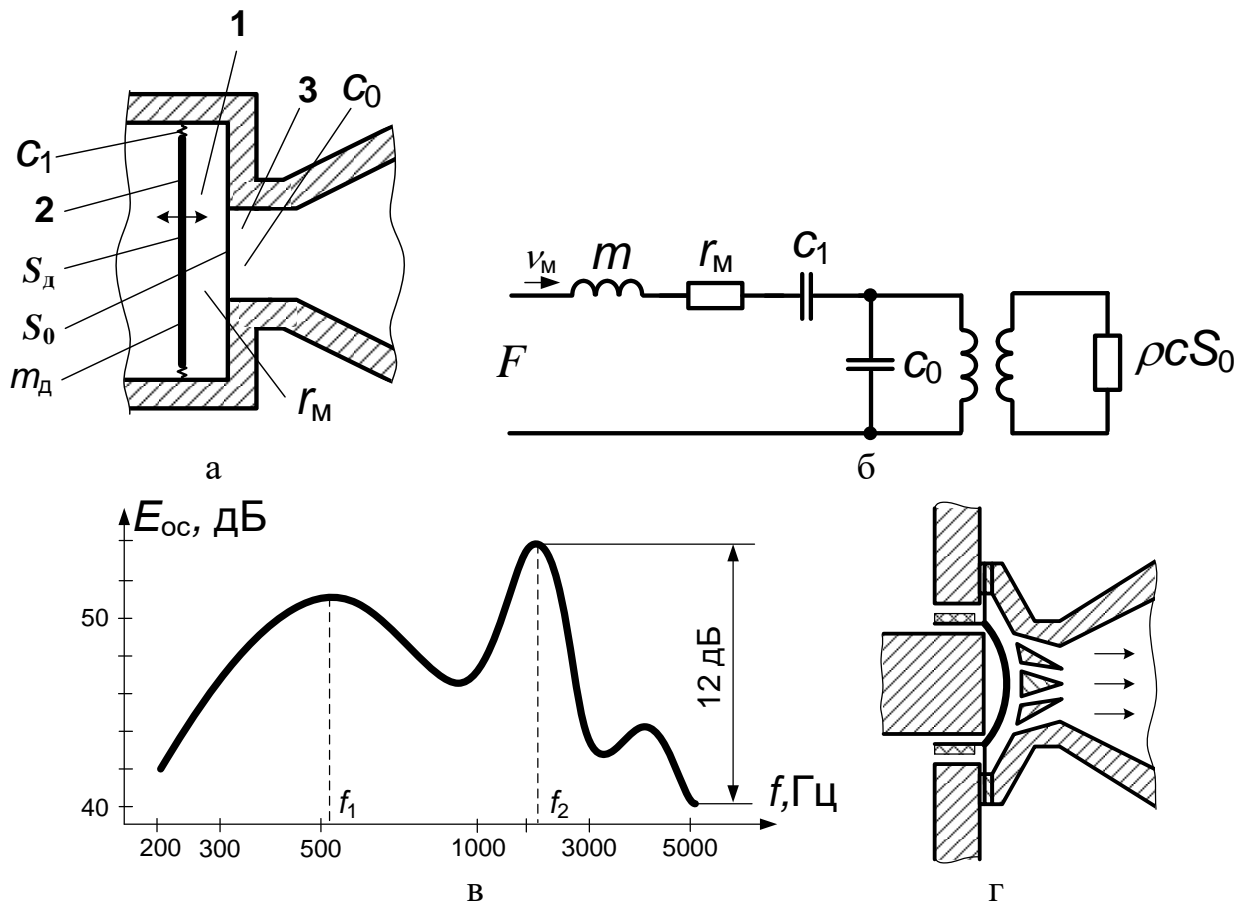


Рисунок 3.18 - До побудови частотної характеристики рупорного гучномовця а) з'єднання головки гучномовця з рупором (1 - передрупорна камера, 2 - діафрагма гучномовця, 3 - вхідний отвір рупора); б) схема аналогу механоакустичної системи; в) частотна характеристика чутливості; г) форма в перерізі з радіальними каналами

З цього виразу випливає, що чутливість залежить від частоти тільки через коефіцієнт концентрації, змінюється в невеликих межах, так як для великих випромінюваних поверхонь $K_{\text{випр}} \approx 1$. Щоб чутливість електродинамічного рупорного гучномовця практично не залежала від частоти, необхідно, щоб і механічна чутливість $\frac{v_0}{F} = \frac{1}{z_m}$ теж не залежала від частоти.

Механічна коливальна система - діафрагма - є коливальна система з масою m (маса рухомої системи), гнучкістю підвісу C_1 і активним опором втрат R_m через тертя звукової котушки об повітря в зазорі (рис. 3.18).

Гнучкість об'єму повітря в передрупорній камері C_0 з'єднана послідовно з гнучкістю комірця діафрагми C_1 , так як об'єм повітря в передрупорній камері підвищує пружність механічної системи.

Через стисливість повітря передрупорна камера шунтує вхідний опір рупора. У зв'язку з цим в схемі аналогу вони з'єднані паралельно через акустичний трансформатор (рис. 3.18). Вхідний опір рупора можна вважати активним.

За такої схеми коефіцієнт передачі від входу механічної системи до рупора майже не залежить від частоти в межах діапазону: від частоти механічного резонансу рухомої системи $\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{1}{\sqrt{mC_1}}$ до частоти послідовного резонансу між масою рухомої системи m і гнучкістю передрупорної камери C_0

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = \frac{1}{\sqrt{mC_0}}.$$

Частотна характеристика для такої схеми наведена на рис. 3.18, в. Вдається отримати достатню рівномірність характеристики (12...15 дБ) в діапазоні 200...4000 Гц.

Однією з причин обмеження частотного діапазону рупорного гучномовця є компенсація звукового тиску в передрупорній камері внаслідок того, що на частотах, довжина хвилі яких близька до діаметру передрупорної камери, спостерігається зменшення звукового тиску в горлі рупора. Пояснюють це тим, що звукові хвилі, які виходять від периферії діафрагми і від її центральної

частини на частотах $f = \frac{c}{2\Delta r}$, де Δr різниця ходу, близька до радіусу діафрагми, виявляються у протифазі (різниця ходу Δr виходить рівною $0,5\lambda$).

Для усунення цього явища застосовують, наприклад, протиінтерференційні вкладиші, радіальні канали (рис. 3.18, г) тощо. У цьому випадку різниця ходу звукових хвиль зменшується вдвічі. При діаметрі діафрагми, що дорівнює 8,5 см, гранична частота буде не нижче 5000...6000 Гц. Оскільки така ширина частотного діапазону цілком придатна для передачі мови і художніх програм третього класу якості, то цей тип гучномовців застосовують переважно для цих та інших другорядних передач.

У широкогорлих рупорних гучномовцях як головки використовують дифузорні гучномовці. Як правило, їх застосовують без передрупорної камери, тому що вхідний опір рупора достатньо великий і мало відрізняється від механічного опору рухомої системи, що не вимагає узгоджувального трансформатора. Широкогорлий рупор буде коротким, навіть за невеликих показників розширення, тобто для низької критичної частоти, оскільки вхідний отвір рупора досить великий. Гучномовці з таким рупором передають більш широкий частотний діапазон, ніж вузькогорлі. Він становить не вужче 100...6000 Гц за такою ж нерівномірністю (~ 15 дБ). Крім того, широкогорлі рупори не вносять великих нелінійних спотворень в передачу, так як коефіцієнт розбіжності хвилі у них невеликий. Широкогорлі гучномовці

електродинамічного типу в більшості випускають потужністю від 25 Вт до 100 Вт.

Рупорні гучномовці мають ККД вище, ніж дифузорні внаслідок більш кращого узгодження механічного та акустичного опорів. Так, наприклад, рупорний гучномовець 100 ГРД-1 розвиває номінальний звуковий тиск в перерахунку на 1 м, що дорівнює 48 Па, за номінальної електричної потужності в 100 Вт. Вимірювати звуковий тиск, що створено рупорним гучномовцем на відстані 1 м, не можна через нерівномірності ближнього поля. Підставляючи ці дані у формулу для розрахунку ККД і враховуючи, що коефіцієнт осьової концентрації Ω дорівнює 25, отримуємо ККД $\eta = 4\pi \cdot 48^2 \cdot 100 / 412 \cdot 25 \cdot 100 = 2,68\%$

За більш високого коефіцієнта електромеханічного зв'язку можна отримати ККД до 5...7%, наприклад, збільшенням індукції в зазорі в 1,5 рази. Зменшивши масу рухомої системи можна підвищити ККД до 20%. Коефіцієнт нелінійних спотворень у вузькогорлих рупорних гучномовцях в загальному випадку буде не менше, ніж у дифузорних, так як спотворення зменшуються в механічній системі і збільшуються в рупорі. У широкогорлих рупорах вони значно менші.

Коефіцієнт осьової концентрації рупорних гучномовців знаходиться в межах 25...50 і може бути підвищений до 100 збільшенням розмірів гирла рупора.

3.5 ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИЙ, П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ТА ІНШІ ВИДИ ГУЧНОМОВЦІВ

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИЙ (КОНДЕНСАТОРНИЙ) ГУЧНОМОВЕЦЬ

На рис. 3.19 наведено схематичну конструкцію конденсаторного гучномовця. На ребристому напівциліндрі **1** за допомогою гвинта **3** натягнута тонка металева фольга **2**, що з внутрішньої сторони облицьована діелектриком, або полімерна плівка, покрита металом зовні. Поверхні напівциліндра і фольга служать електродами конденсатора. Між електродами прикладена напруга поляризації U_0 . Якщо на ці електроди подати ще змінну напругу U , то сила тяжіння електродів

$$F_{\equiv} = \frac{(U_0 + U)^2 S}{8\pi d^2},$$

де S - площа електродів; d - відстань між електродами.

За умови $U \ll U_0$ можна знехтувати квадратичної складовою, і тоді змінна сила $F = \frac{CU_0 U}{d}$, оскільки $C = \frac{S}{4\pi d}$. Отже, силу, що діє на гнучкий електрод, визначено градієнтом напруги поляризації $\frac{U_0}{d}$, ємністю конденсатора C і змінною напругою. Відповідно до принципу взаємності коефіцієнт електромеханічного зв'язку буде таким же, як і для конденсаторного мікрофона

$$K_{\text{св}} = \frac{F}{i} = \frac{CU_0 U Z_{\text{вх}}}{U d} \approx \frac{U_0}{\omega d},$$

тобто коефіцієнт електромеханічного зв'язку обернено пропорційний частоті, а електрична характеристика $\frac{i}{U} \approx \omega C$ прямо пропорційна частоті. Тому вони взаємно компенсують один одного.

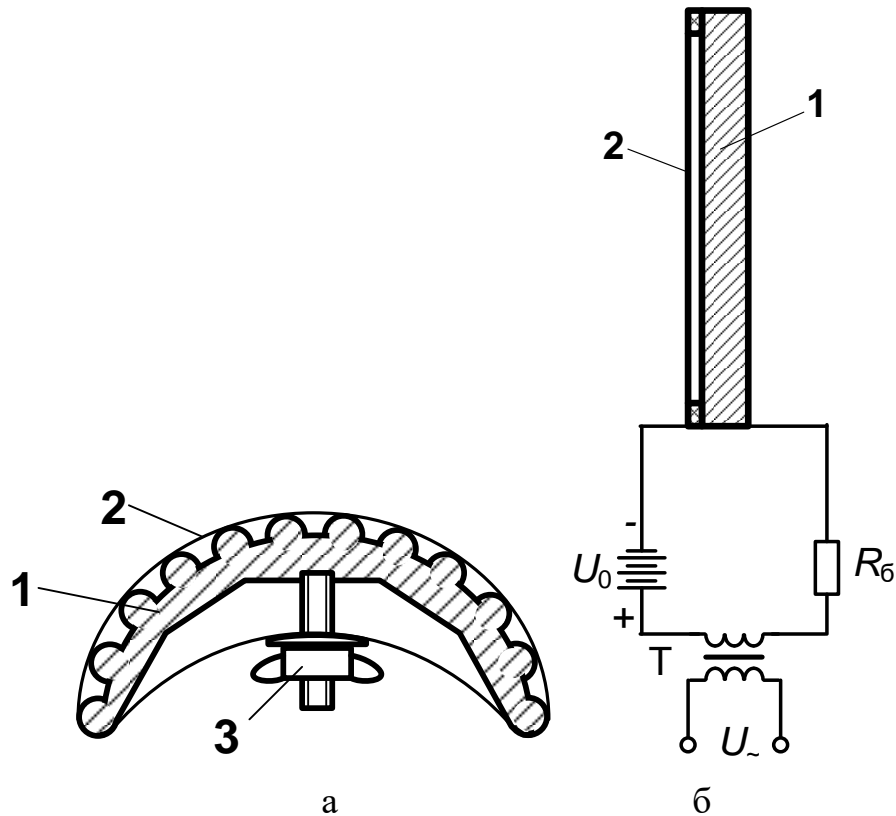


Рисунок 3.19 - Конденсаторний гучномовець:

а) конструкція (1 - масивний електрод; 2 - гнучкий електрод з ізоляцією; 3 – натягувальний гвинт); б) схема підключення;

Конденсаторний гучномовець використовують, як правило, як високочастотний елемент акустичних систем. Наприклад, в разі зовнішніх розмірів 15×10 см і довжині хвилі не більше 8 см (тобто частоті 4250 Гц) такий гучномовець матиме опір випромінювання, близький до опору плоскої хвилі, тобто коефіцієнт випромінювання $K_{\text{випр}}$ не буде залежати від частоти, а акустична чутливість через збільшення коефіцієнта концентрації буде повільно зростати зі збільшенням частоти.

Для отримання частотнонезалежної чутливості такого гучномовця необхідно, щоб його механічний опір повільно зростав із збільшенням частоти. Якщо вибрати частоту резонансу механічної системи на нижній межі відтворюваного діапазону частот, то вище її механічний опір буде рости пропорційно частоті. Для часткової компенсації цього зростання послідовно з гучномовцем підключають активний електричний опір R_6 (рис. 3.19, б), який зменшує падіння напруги на гучномовці зі збільшенням частоти, і, таким чином, його чутливість є незалежною від частоти.

Градiєнт напруги поляризації $\frac{U_0}{d}$ обмежено електричною міцністю плівки, тому чутливість гучномовця залежить тільки від розмірів випромінювача. Є

гучномовці конденсаторного типу і на широкий діапазон частот, але виробництво їх дуже дороге.

Електретні гучномовці відрізняються від конденсаторних тільки застосуванням в них електретної плівки, заздалегідь наелектризованої. У іншому їх конструкція, робота і застосування ті ж самі, що і для конденсаторних гучномовців. Промислового виробництва цих гучномовців поки немає.

П'ЕЗОГУЧНОМОВЦІ

Дія таких гучномовців засновано на п'єзоефекті. Якщо до пластинки з п'єзокристала прикласти напругу, то пластина буде деформуватися. В разі змінної напруги пластинка буде піддана змінній деформації. При відповідному зрізі можна змусити пластинку згинатися. Якщо при цьому її край зв'язати з дифузором, то вийде гучномовець безпосереднього випромінювання. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку для такого перетворювача є таким же, як і у конденсаторного гучномовця, якщо коефіцієнт $K = U/a$ замінити на поляризаційний коефіцієнт K_H . В іншому він схожий з конденсаторним гучномовцем. Мала кліматична стійкість сегнетової солі, низька чутливість п'єзокераміки, велика нерівномірність частотної характеристики, а також високий вхідний опір і великі нелінійні спотворення завадили впровадженню цього типу гучномовців в систему мовлення і зв'язку.

ПНЕВМАТИЧНИЙ ГУЧНОМОВЕЦЬ

Пневматичний гучномовець заснований на принципі модуляції постійного потоку повітря. Для його роботи потрібно компресор, стиснене повітря з якого підводять до заслінки, що коливається. Для приведення останньої у коливальний стан застосовують збудник, наприклад, у вигляді електродинамічного перетворювача, подібного голівці динамічного гучномовця. Постійний потік повітря замикається близько гучномовця, а змінний тиск у вигляді звукових хвиль поширюється в далечінь. Такий гучномовець вимагає невеликої потужності для керування збудником, тобто більш «дорога» потужність, необхідна для збудження, потрібна невелика, а для роботи компресора витрачається більше «дешева» потужність. (Гучномовець дає великі нелінійні спотворення і його поки не застосовують, хоча він може бути використаний для цілей оповіщення, так як з його допомогою можна створити дуже великі рівні).

ГУЧНОМОВНІ АКУСТИЧНІ СИСТЕМИ

Для роботи в широкому діапазоні переданих частот створюють системи, що складено з декількох гучномовців, кожен з яких передає порівняно вузьку смугу частот. При створенні вузькосмугових гучномовців з рівномірною частотною характеристикою не виникає таких труднощів, з якими стикаються при розробці широкодіапазонних гучномовців.

Якщо, наприклад, обмежити діапазон зверху частотою 3 кГц, то його нижню межу можна знизити до 30...40 Гц. Також, якщо обмежити діапазон знизу частотою 3000 Гц, то верхню межу вдається підвищити до 15 кГц. Тому випускаються дво- і трисмугові системи.

Для двосмугових систем діапазон ділять на частоти приблизно від 300 Гц до 500 Гц або від 2000 Гц до 4000 Гц. А для трисмугових середню смугу оберають приблизно від 400 Гц до 4000 Гц.

Подібні системи випускають для радіомовних пристроїв, причому для трисмугових беруть один-два низькочастотних гучномовця, один або два середньочастотних і два-три високочастотних. Такі ж системи виготовляють і для ряду радіо- і телеприймачів. Застосування в системах більшої кількості високочастотних гучномовців, ніж низькочастотних, пояснюють кращою спрямованістю високочастотних. Для отримання однакового випромінювання на всі сторони осі високочастотних гучномовців розташовують в різних напрямках.

Для стереофонічного відтворення застосовують спеціальні рознесені акустичні системи, кожна з яких працює від свого каналу. До цих гучномовців пред'являють порівняно жорсткі вимоги щодо ідентичності звучання.

Гучномовні системи комплектують або з одних дифузورних гучномовців електродинамічного, або електростатичного типу (останні застосовують тільки як високочастотні елементи), або з дифузорних низькочастотних і рупорних високочастотних, або рупорних низькочастотних (зазвичай потужних, застосовуваних в кінотеатрах) і дифузорних високочастотних. Існують варіанти вузькогорлих рупорних гучномовців для роздільної передачі низькочастотного і високочастотного діапазонів. Для низькочастотного діапазону застосовують гучномовці з дуже довгим рупором (у вигляді равлика), що має великий вихідний отвір. Відтворюваний ним частотний діапазон знаходиться в межах від 50 Гц до 500 Гц. Високочастотні рупорні гучномовці мають відповідно маленькій рупор (довжиною не більше 20 см з діаметром вихідного отвору не більше 10 см). Відтворюваний ними частотний діапазон знаходиться в межах від 2000 Гц до 15000 Гц.

Для розділення частотних діапазонів застосовують спеціальні схеми розділення. Одна з таких схем відрізняється незалежністю вхідного опору від частоти. Для високоякісних систем схема розділення частотних діапазонів набагато складніша (рис. 3.20). Умови для цього такі

$$R_{НЧ} = R_{ВЧ} = \sqrt{\frac{L}{C}},$$
$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

де L - індуктивність, що включена в розділовий пристрій; C - його ємність; $R_{НЧ}$ і $R_{ВЧ}$ - опори НЧ і ВЧ гучномовців; f_0 - частота розділення діапазонів (500 або 2000 Гц).

Отже, для забезпечення вищого класу точності передачі художніх програм придатні тільки системи. Для першого класу точності можуть використовуватись як поодинокі динамічні гучномовці, так і звукові колонки, рідше застосовуються системи. Для другого класу точності передачі художніх програм і для мовних передач використовуються рупорні гучномовці і поодинокі дифузорні, іноді навіть без всякого оформлення.

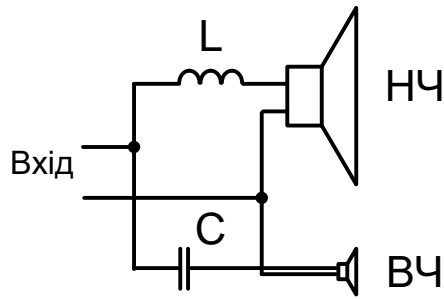


Рисунок 3.20 - Схема пристрою, що розділяє частотні смуги на відповідні гучномовці

3.6 ТЕЛЕФОНИ

Телефони призначено для роботи безпосередньо на об'єм слухового каналу, тому його технічні параметри дещо відрізняються від параметрів гучномовців.

Чутливість телефону - відношення ефективних значень звукового тиску, що створює телефон в камері штучного вуха, до напруги, яку прикладено до телефону. Камера штучного вуха являє собою об'єм, відповідний середньому об'єму слухового каналу і вушної раковини (6 см^3) або тільки слухового каналу (2 см^3) залежно від типу випробуваного телефону.

Віддача телефону - звуковий тиск, що створює телефон в камері штучного вуха, при підведенні до нього стандартної потужності в 1 мВт через опір, що дорівнює вхідному опору телефону на частоті 1000 Гц.

Крім того, телефони, як і гучномовці, характеризують такими технічними параметрами: вхідним опором, нелінійними спотвореннями і частотною залежністю віддачі або чутливості телефону. Нерівномірність частотної характеристики, зазвичай, прийнято визначати з частотної залежності віддачі телефону.

За принципом дії телефони розподіляють на електромагнітні, електродинамічні і електростатичні.

Найбільш широке застосування для високоякісного прослуховування радіопередач, звукового супроводу телебачення і звукозаписів мають стереофонічні електродинамічні телефони. Як приклад наведемо конструкцію такого телефону (рис. 3.21, а).

У корпусі 2 розташовано мініатюрну електродинамічну головку гучномовця 1 з дифузorzом або з напівсферичною діафрагмою. Простір між ним і корпусом заповнено звукопоглинальним матеріалом (поролоном) 5. Перед гучномовцем розміщено перфоровану решітку 3. До краю корпусу примикає м'який амбушур, який прижимають до вушної раковини. Такий телефон (у парі) дозволяє отримати високоякісне відтворення, особливо низьких частот, за малої потужності, що підведена, забезпечивши дуже хороший стереофонічний ефект і досить надійно звукоізолювавши слухача від зовнішніх шумів, а оточуючих людей - від звуків відтворення.

Відмінність конструкції квадрафонічного телефону полягає в тому, що на кожне вухо діють два електродинамічних перетворювача - мініатюрних

гучномовця переднього і заднього каналів. Перетворювачі передніх каналів розташовуються навпроти входу в слухові канали вух, а задніх - зміщені за вушну раковину, що дещо послаблює високі частоти. Іноді обидва перетворювача підключають через спеціальний електричний контур, що дозволяє підкреслити низькі частоти для одного перетворювача і високі для іншого.

Відомі головні телефони, що застосовують електродинамічний принцип, але без застосування мініатюрних головок гучномовців. Найбільш відомий з них - так званий ізодинамічний. Його складено з магнітної системи і діафрагми. Оригінальна магнітна система складена з двох дископодібних магнітів, наприклад, з фериту барію, намагнічених таким чином, що кожен з них має три пари полюсів. Скажімо, центральна частина, обмежена окружністю, має полярність N, наступна кільцева - S і зовнішня кільцева - N (рис. 3.21,б). Таким чином, по поверхні магніту проходять два радіальних магнітних потоки. Так само намагнічений і другий магніт. Магніти по всій своїй площині перфоровані, для того, щоб забезпечити прохід звуку через отвори при коливаннях діафрагми з синтетичної плівки, натягнутої між магнітами на рівних відстанях від поверхні кожного з них. На плівку нанесено провідник у вигляді спіралі. У тому місці, де зустрічаються протилежно спрямовані потоки (окружність, що проходить через точку A на рис. 3.21, б), витки спіралі йдуть у зворотному напрямку.

Таким чином, збережено одне і те ж взаємне розташування магнітного поля і електричного струму. Завдяки тому, що діафрагму такого телефону збуджено по всій поверхні, він дуже ефективний, має рівномірну частотну характеристику і дуже малі нелінійні спотворення.

Деяке поширення в даний час отримали електростатичні телефони. Між двома нерухомими перфорованими для пропускання звуку пластинами 2 знаходиться рухома пластина 1, що під'єднана до одного з виводів джерела постійної напруги (напруги поляризації), що дорівнює практично в середньому 100 В. Інший вивід джерела напруги поляризації підключено до середньої точки вторинної обмотки трансформатора, до виводів якої приєднані нерухомі пластини. Первинну обмотку трансформатора підключено до виходу підсилювача. Все це розташовано в корпусі, забезпеченому амбушюром, як і інші типи телефонів. Конструкції телефонів передбачає, щоб напруга поляризації не має потрапити на слухача. Електростатичний телефон має високі якісні показники.

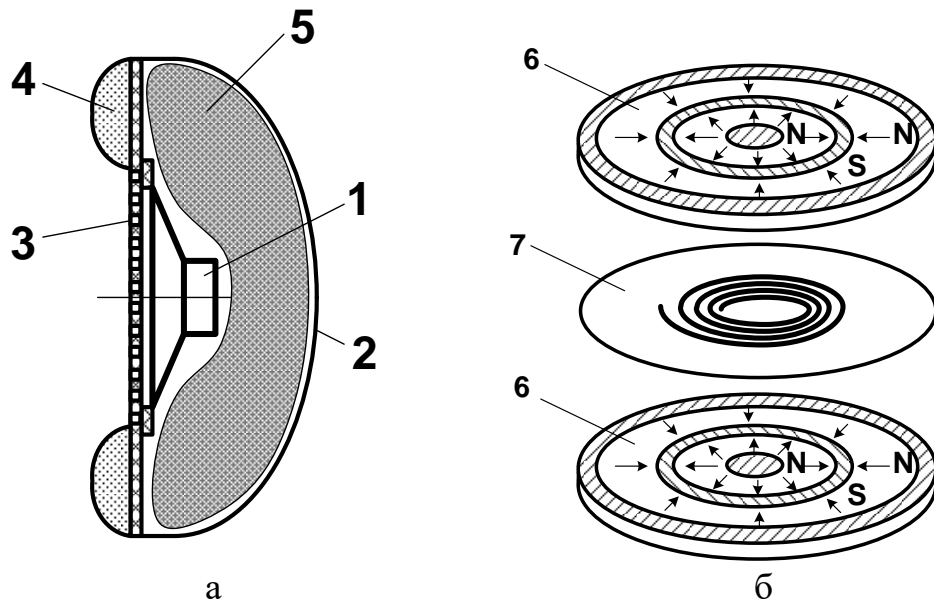


Рисунок 3.21 – Конструкція електродинамічного телефону з мініатюрним гучномовцем (а) та ізодинамічного (б)

- 1 - мініатюрний електродинамічний гучномовець; 2 - корпус; 3 - перфорована решітка; 4 - м'який амбушур, що притуляють до вушної раковини; 5 - звукопоглинальний матеріал - поролон; 6 – перфорований магніт; 7 – діафрагма з обмоткою

Контрольні питання

1. Назвіть основні класифікаційні ознаки гучномовців.
2. Назвіть основні технічні параметри гучномовців та наведіть орієнтовні числові значення параметрів.
3. Поясніть принцип дії та конструкцію електродинамічної головки гучномовця.
4. Наведіть вираз чутливості гучномовця, складеного із чутливостей окремих ланок.
5. Навести визначення гучномовців – акустична система, звуковий монітор, звукова колонка, широкосмуговий, багатосмуговий.
6. Навести визначення потужностей гучномовців.
7. Навести визначення чутливості, стандартного звукового тиску, характеристичної чутливості, характеристичної потужності, рівнів за цими параметрами тощо гучномовців.
8. Поясніть основне призначення та види акустичного оформлення гучномовців.
9. Поясніть способи корекції конструктивних елементів гучномовців для отримання більш лінійної частотної характеристики.
10. Наведіть порівняльний аналіз гучномовців у закритому орпусі та у корпусі з фазоінвертором.
11. Наведіть конструкції та принципи роботи телефонів.
12. Поясніть принцип роботи дифузора широкосмугової головки на різних частотах.
13. Поясніть особливості роботи та конструкцію рупорного гучномовця.
14. Поясніть принцип акустичного короткого замикання при роботі гучномовця.
15. Наведіть еквівалентні схеми гучномовців з різним акустичним оформленням.
16. Наведіть приклади конструкції та принципи роботи електростатичного, п'єзоелектричного, пневматичного гучномовців.
17. Назвіть основні причини малого коефіцієнта корисної дії та появи нелінійних спотворень гучномовців.

4 МЕТОДИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНОЇ АПАРАТУРИ

Для вимірювання параметрів електроакустичного обладнання застосовують широку номенклатуру вимірювальної апаратури, а саме тональні генератори, електронні вольтметри, вимірювачі нелінійних спотворень, вимірювачі рівня, осцилографи, аналізатори гармонік, магнітофони, вимірювальні підсилювачі тощо. Крім апаратури загального застосування для акустичних вимірювань застосовують спеціальну вимірювальну апаратуру, до якої відносять: тональні генератори з «виючим» тоном, шумові генератори, вимірювачі звукового тиску, акустичні зонди, шумоміри, октавні фільтри, швидкодійні реєстратори рівня, реверберометри, штучний рот, вимірювальні телефони, штучне вухо, вимірювальні труби, спектральні аналізатори, аналізатори амплітудних розподілів, пістонофони та додаткові електроди тощо.

Таким вимірювальним обладнанням можна вимірювати всі види характеристик електроакустичної апаратури (частотні, амплітудні, спрямованості, часові), проводити аналіз акустичних сигналів і шумів і записувати часові процеси в приміщеннях тощо.

Всі частотні характеристики визначають (або відповідні параметри вимірюють) в разі поступової зміни частоти або на частотах переважного ряду (20; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000; 12000; 16000; 20000 Гц). В окремих випадках параметри вимірюють на частотах з нерівномірним рядом (наприклад, 20; 31,5; 40; 63; 80; 125; 250; 500; 1000; 2000; 3000; 4000; 6000; 8000; 10000; 12000; 14000; 16000; 18000; 20000 Гц). У всіх випадках вимірювань на дискретних частотах необхідно відзначати місця максимумів і мінімумів і на них вимірювати значення параметрів (див. рис. 3.3).

Всі характеристики спрямованості вимірюють або за плавної зміни кутів розташування осей випробуваної апаратури, або для кутів, кратних 15° на частотах до 5000 Гц і кратних 5° вище цієї частоти.

Вимірювання характеристик мікрофона в заглушеній камері (у вільному полі).

Для вимірювання *чутливості* мікрофона у вільному полі необхідно спочатку виміряти звуковий тиск в точці, куди буде встановлений випробуваний мікрофон, а потім вже встановлювати його в цю точку. Але так як в камері практично відсутня інтерференція і відстань мікрофона від гучномовця беруть в межах 1...1,5 м для діаметра випромінювача не більше 25 см, то вимірювальний мікрофон $M_{\text{вимір}}$ (рис. 4.1) можна розташовувати поблизу від випробуваного мікрофона $M_{\text{випр.}}$.

Встановивши за вимірювачем звукового тиску (мілівольтметру з шкалою у Па) необхідний тиск p , вимірюють напругу U_m , що створено випробуваним

мікрофоном, і визначають осьову чутливість мікрофона $E_{oc} = U_m / p$.

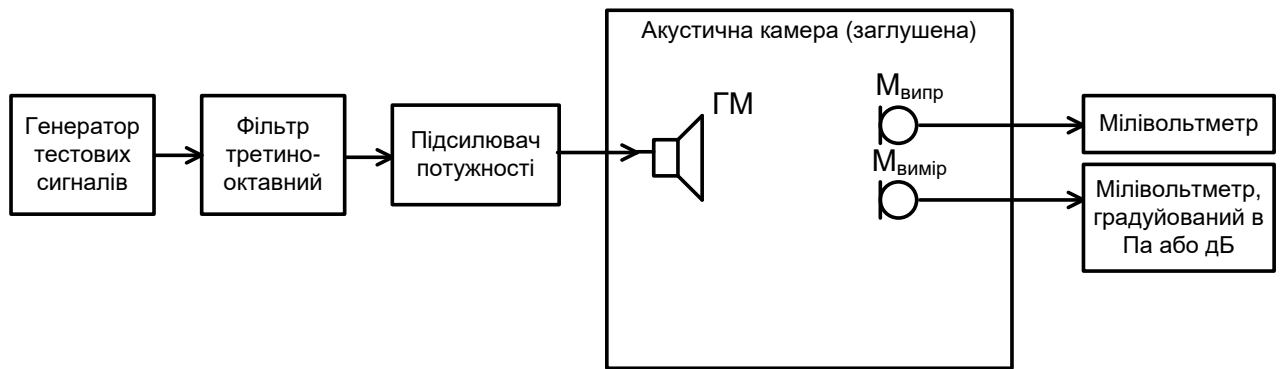


Рисунок 4.1 - Схема вимірювання чутливості мікрофона:

ГМ - гучномовець; $M_{випр}$ - випробуваний мікрофон;

$M_{вимір}$ - вимірювальний мікрофон

В разі автоматичного регулювання осьового тиску, як відомо, частотну характеристику знімають шляхом плавної зміни частоти генератора. Чутливість визначають у всьому номінальному діапазоні частот. За отриманою частотною характеристикою визначають нерівномірність її в номінальному і робочому діапазонах частот. Середню чутливість визначають в мілівольтах на Паскаль за формулою

$$E_{cp} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{E_k^2}{n}};$$

де E_k - чутливість, що визначена на частотах переважного ряду, що входять в номінальний діапазон частот, або у третинооктавних смугах; n - число точок відліку. За нерівномірності менше 12 дБ допускають визначати середньоарифметичне значення чутливості за формулою

$$E_{cp} = \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{n}.$$

Рівень чутливості і середньої чутливості в децибелах обчислюють за формулою

$$N_m = 20 \lg \frac{E_m \cdot 10^{-3}}{E_1};$$

де E_m - чутливість, мВ / Па; E - чутливість, що дорівнює 1 мВ / Па.

Стандартний рівень чутливості (в децибелах) визначають за формулою

$$N_m = 20 \lg \frac{U_0 \big|_{p=1 \text{ Па}}}{\sqrt{R_{ном} \cdot 10^{-3}}} = 20 \lg \frac{E_{oc}}{\sqrt{R_{ном} \cdot 10^{-3}}};$$

де U_0 - напруга (у вольтах), що створена мікрофоном на номінальному опорі навантаження при звуковому тиску 1 Па, тобто чутливість E_{oc} , В/Па, $R_{ном}$ -

номінальний опір навантаження, Ом.

Характеристику спрямованості мікрофона визначають за схемою рис. 4.1, причому залежно від завдання або на декількох частотах, використавши тональний генератор, або для шумового сигналу у третинооктавних смугах, або для заданої смуги частот, використавши замість третинооктавних фільтрів відповідний смуговий фільтр.

Для зняття характеристик спрямованості випробуваний мікрофон встановлюють на поворотному диску з німбом. Диск обертають вручну або автоматично, синхронно з реєструючим столиком. Характеристику знімають в одній площині, що проходить через робочу вісь мікрофона якщо він являє собою тіло обертання щодо своєї осі. Для інших форм тіла мікрофона характеристику знімають для заданих площин, що проходять через робочу вісь. Кут повороту відраховують між робочою віссю і напрямком на джерело звуку. Нормують характеристику спрямованості відносно осьової чутливості, тобто чутливості, що виміряна під кутом 0° до осі мікрофона (E_{oc}). Рівень чутливості

$$N_\theta = -20 \lg \frac{E_\theta}{E_{oc}},$$

де E_θ - чутливість під кутом θ (E_{oc} - осьова чутливість).

Перепад чутливості фронт-тил визначають як різницю рівнів чутливості під кутами 0° та 180° між робочою віссю мікрофона і напрямком на джерело звуку. Цей перепад визначають для ряду частот номінального діапазону або для заданої смуги частот. За виміряними даними знаходять середній перепад чутливості як відношення середніх чутливостей, вимірянних для кутів 0° і 180° .

Рівень еквівалентного звукового тиску, обумовленого власними шумами мікрофона і різними перешкодами, роздільно для кожної перешкоди вимірюють в заглушеній камері за схемою рис. 4.1 за відсутності джерела звуку і обчислюють за формулою

$$L_{ш} = -20 \lg \frac{U_{вих}}{E_{діюч} p_0},$$

де $U_{вих}$ - напруга на виході мікрофона, мВ; p_0 - звуковий тиск, що дорівнює $2 \cdot 10^{-5}$

Па, $E_{діюч} = \sqrt{\sum_{k=1}^6 \frac{E_{oc}^2}{6}}$ - діюча чутливість мікрофона у вільному полі, мВ / Па; E_{oc} -

значення чутливості (в мілівольтах на Паскаль), що виміряна на частотах 200, 250, 315, 400, 500 і 630 Гц (або у відповідних смугах частот третинооктавних фільтрів).

Вимірювання характеристик мікрофона в ревербераційній камері (у дифузному полі).

У цій камері вимірюють дифузну чутливість мікрофона. Розміщують вимірювальний мікрофон в зоні чисто дифузного поля (рис. 4.2) поблизу від випробуваного мікрофона, вимірюють вихідні напруги $U'_{\text{диф}}$ й $U_{\text{диф}}$, що створено ними. Чутливість у дифузному полі обчислюють або за формулою

$$E_{\text{диф}} = \frac{E'_{\text{диф}} U_{\text{диф}}}{U'_{\text{диф}}},$$

де $E'_{\text{диф}}$ - чутливість вимірювального мікрофона у дифузному полі, мВ / Па, або за формулою

$$E_{\text{диф}} = \sqrt{0,018(E_{0^\circ}^2 + E_{180^\circ}^2) + 0,129(E_{30^\circ}^2 + E_{150^\circ}^2) + 0,224(E_{60^\circ}^2 + E_{120^\circ}^2) + 0,258E_{90^\circ}^2}$$

де E_{0° , E_{30° , E_{90° ... - чутливість мікрофона під відповідними кутами (виміряна або визначена з характеристики спрямованості). Числові коефіцієнти являють собою відносну величину широтних поясів на сферичній поверхні під різними кутами до осі сфери, тобто до осі мікрофона.

Аналогічно до вимірювань у заглушеній камері знімають частотну характеристику чутливості мікрофона в дифузному полі і визначають середню чутливість і рівень чутливості.

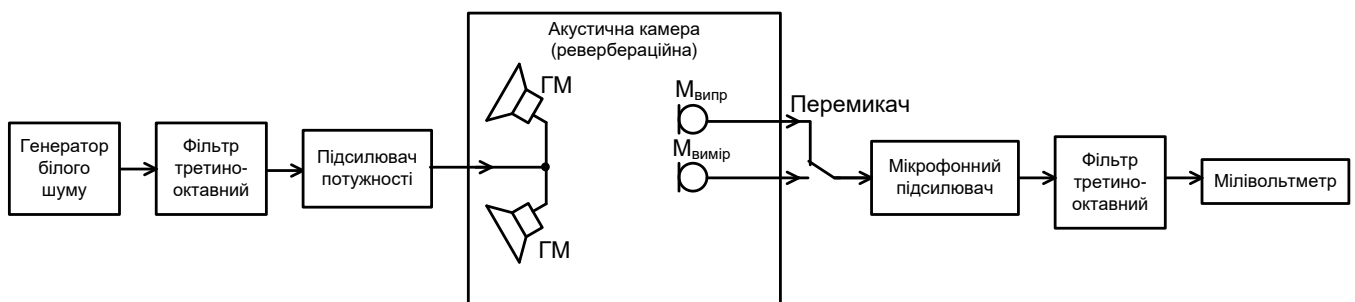


Рисунок 4.2 - Схема вимірювання дифузної чутливості мікрофона:

ГМ - гучномовець; $M_{\text{випр}}$ - випробуваний мікрофон;

$M_{\text{вимір}}$ - вимірювальний мікрофон

Коефіцієнт спрямованості обчислюють за формулою

$$\Omega_m = \frac{E_{\text{ос}}^2}{E_{\text{диф}}^2},$$

де $E_{\text{ос}}$ й $E_{\text{диф}}$ - чутливості у вільному і дифузному полі, мВ/Па. Індекс спрямованості обчислюють за формулою

$$Q_m = 10 \lg \Omega_m.$$

Вимірювання характеристик мікрофонів ближньої дії.

Ці вимірювання проводять за допомогою штучного рота (див. рис.4.3). Мікрофон встановлюють на відстані 1,5...2,5 см від отвору рота і вимірюють напругу, що розвивається ним за рівня звукового тиску в точці мікрофона, який дорівнює 1 Па. Пристрій попередньо градуують еталонним вимірювачем звукового тиску за напругою на його вході.

Вимірювання рекомендують проводити в заглушеному ящику далеко від поверхонь, що відбивають, характеристику спрямованості мікрофона вимірюють в заглушеній камері (тобто лише для віддаленого джерела звуку).

Відношення чутливостей мікрофона, виміряних в ближньому полі з штучним ротом і в дифузному полі, визначає шумостійкість мікрофона. Інші параметри визначають так само, як і для звичайних мікрофонів.

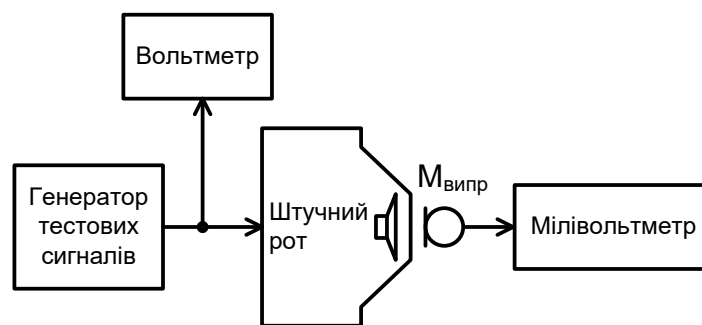


Рисунок 4.3 - Схема вимірювання чутливості мікрофона ближньої дії:

$M_{\text{випр}}$ - випробуваний мікрофон

Вимірювання внутрішнього опору мікрофона. Внутрішній опір вимірюють, наприклад, при зміні навантажувального активного опору (магазину опорів на рис. 4.4). Опір навантаження, за яким відбувається зменшення вихідної напруги вдвічі в порівнянні з холостим ходом, відповідає внутрішньому опору мікрофона.

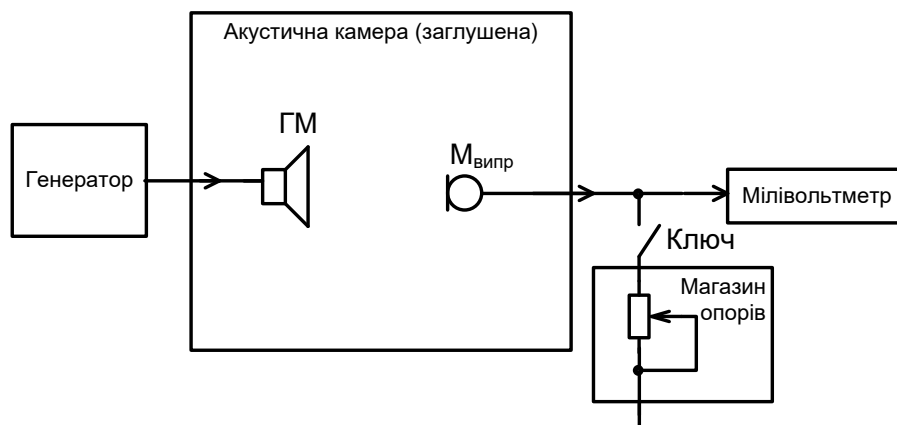


Рисунок 4.4 - Схема вимірювання внутрішнього опору мікрофона

ГМ - гучномовець; $M_{\text{випр}}$ - випробуваний мікрофон

Вимірювання характеристик гучномовців в заглушеній камері.

Для зняття характеристик гучномовця вимірювальний мікрофон встановлюють на відстані $r = (2...4)d$ від нього, де d - середній розмір випромінювача (рис. 4.5). Напругу, що підводять до гучномовця, встановлюють відповідно формулі

$$U = \sqrt{0,1 P_{\text{ном}} R_{\text{ном}}},$$

де $P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність гучномовця; $R_{\text{ном}}$ - його номінальний вхідний опір. (Для гучномовців потужністю менше 0,5 Вт напругу беруть ближче до номінальної.) В разі випробувань на номінальну потужність синусоїдну напругу беруть рівною номінальній, а шумову - рівною 0,707 від номінальної.

Вимірювачем звукового тиску або мілівольтметром з шкалою у паскалях реєструють звуковий тиск, що створено гучномовцем залежно від частоти, на якій збуджують гучномовець (за тонального збудження), або середній частоті третинооктавного фільтра (в разі збудженні від генератора білого шуму). Цей тиск розраховують за формулою

$$p = \frac{U_0}{E_{\text{ос}}},$$

де U_0 - напруга, що створена вимірювальним мікрофоном, мВ; $E_{\text{ос}}$ - осьова чутливість вимірювального мікрофона (мВ / Па) на заданій частоті.

Вимірювання проводять на частотах переважного ряду з реєстрацією піків і провалів частотної характеристик і не вужче 1/8 октави (для шумового збудження цього не потрібно). Більш переважним є вимірювання з плавною зміною частоти генератора і реєстрацією характеристик на бланку (для цього диск генератора і валик з бланком повинні обертатися синхронно).

Середній звуковий тиск за даними частотної характеристики обчислюють за формулою

$$p_{\text{ср}} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{p_k^2}{n}};$$

де p_k - звуковий тиск, що створено гучномовцем на частоті f_k (або середній частоті k -го третинооктавного фільтра); n - число точок вимірювання (воно не повинно бути менше 10). За нерівномірності частотної характеристики менше 12 дБ можна обчислювати середнє арифметичне значення за формулою

$$p_{\text{ср. ст}} = \frac{p_k}{n}.$$

Середній стандартний звуковий тиск $p_{\text{ср.ст}}$ обчислюють за формулою

$$p_{\text{ср.ст}} = p_{\text{ср}} \frac{l}{l_0} \sqrt{\frac{P_0}{P}},$$

де $p_{\text{ср}}$ - середній звуковий тиск, що створено гучномовцем в номінальному

діапазоні частот, Па; l - відстань від робочого центру гучномовця до вимірювального мікрофона, м; P - електрична потужність, Вт; $P_0 = 0,1$ Вт; $l_0 = 1$ м.

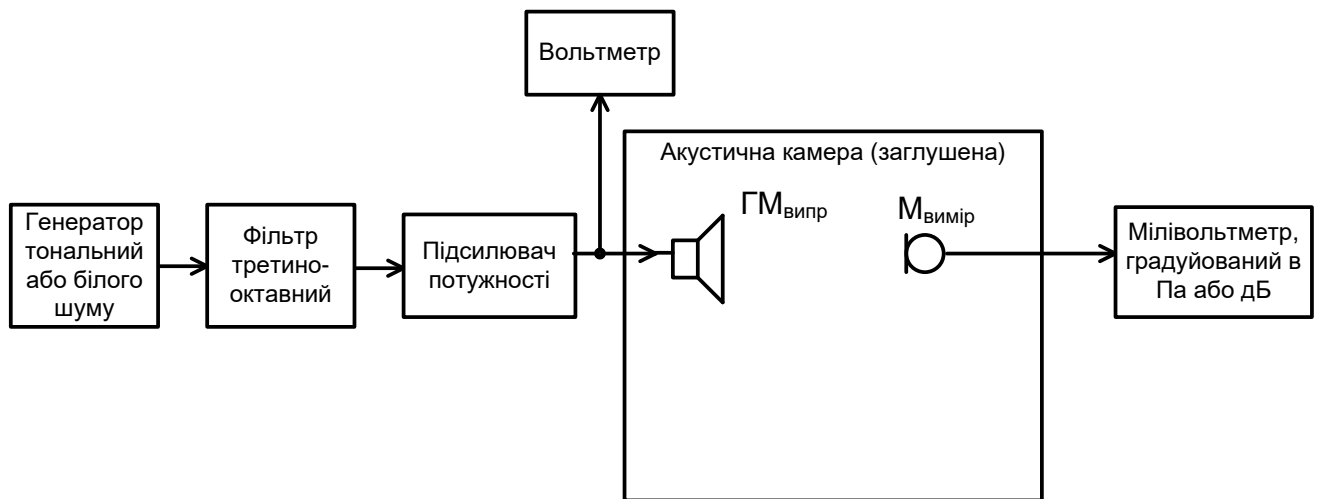


Рисунок 4.5 - Схема вимірювання чутливості гучномовця: генератор тональний або білого шуму з фільтром рожевого шуму; ГМ_{випр} - випробуваний гучномовець; М_{вимір} – вимірювальний мікрофон

Характеристичну чутливість гучномовця на робочій осі обчислюють за формулою (Па / Вт).

$$E_x = p_{\text{ср}} \frac{l}{l_0 \sqrt{P}},$$

де $p_{\text{ср}}$ - середній звуковий тиск в номінальному діапазоні частот, Па; P - електрична потужність, що підводиться до гучномовця, Вт; l - відстань від робочого центру гучномовця до вимірювального мікрофона, м; $l_0 = 1$ м.

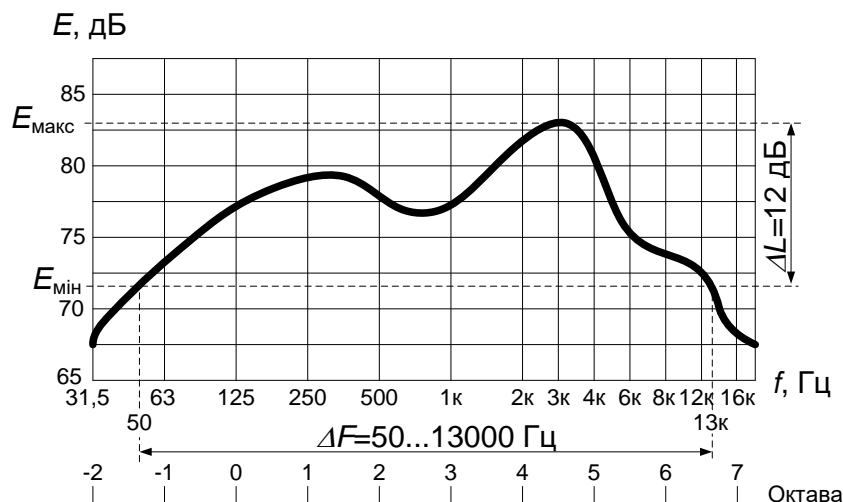
Ефективно відтворюваний діапазон частот знаходять згідно частотній характеристиці гучномовця шляхом визначення частот, відповідних точкам перетину прямої, паралельної осі частот, з частотною характеристикою гучномовця (див. рис. 4.6). Пряму лінію проводять на 10...12 дБ нижче рівня середнього звукового тиску в октавній смузі частот, що відповідає максимальній чутливості гучномовця. Цей рівень обчислюють за формулою

$$N_{\text{max}} = 20 \lg \frac{p_{\text{ср.окт}}}{p_0},$$

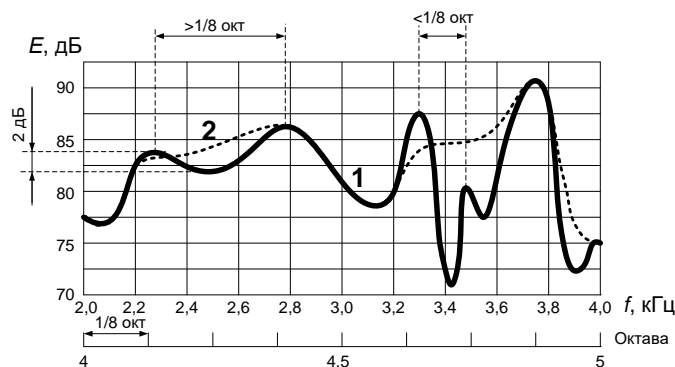
де $p_{\text{ср.окт}} = \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{n}$ - середній звуковий тиск; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па; p_k - звуковий тиск,

що створено гучномовцем на частоті f_k (або середній частоті k -го третиннооктавного фільтра), Па; n - число точок відліку. Для синусоїдного сигналу воно повинно бути не менше 7 (через 1/6 октави), для третиннооктавних фільтрів – не менше 3.

Нерівномірність частотної характеристики гучномовця визначають в номінальному і робочому діапазонах частот.



а



б

Рисунок 4.6 – Визначення діапазону відтворюваних частот та нерівномірності частотної характеристики гучномовця (ΔL припустима нерівномірність ЧХ у визначеному діапазоні частот ΔF ; 1 – реальна крива ЧХ, 2 – апроксимована крива ЧХ з урахуванням припустимих наближень)

Діаграму спрямованості гучномовця знімають в заглушеній камері за схемою рис. 4.5 з поворотом гучномовця навколо осі, що проходить через його робочий центр перпендикулярно його робочій осі. Гучномовець обертають або вручну, або автоматично, синхронно з поворотом столика, на якому закріплений бланк діаграми спрямованості. Для гучномовців з різними розмірами подовжньої і поперечної осей випромінювача знімають дві діаграми спрямованості; в площинах, що проходять через робочу вісь і відповідно подовжню і поперечну осі випромінювача. Діаграми спрямованості знімають або для ряду частот, або для основної частини діапазону. У останньому випадку на гучномовець подають шумову напругу через смуговий фільтр, який має смугу, що відповідає основній.

У тих випадках, коли розміри камери не дозволяють проводити вимірювання характеристик спрямованості гучномовців (наприклад, для великих

звукових колонок і рупорних гучномовців), проводять вимірювання на моделях цих гучномовців з відповідним підвищенням частоти вимірювань.

Вимірювання характеристик гучномовців в ревербераційній камері (рис. 4.7). У цій камері вимірюють звуковий тиск, а випромінювану потужність гучномовця визначають за формулою

$$P_a = \frac{p^2 \cdot 0,16V}{4 \cdot 412T} \approx 10^{-4} \frac{p^2 V}{T},$$

де T - час реверберації в камері, с; p - звуковий тиск дифузного поля, Па; V - об'єм камери, м³.

Однак ця потужність трохи менше тієї, яку розвиває гучномовець у відкритому просторі, так як внаслідок реакції дифузного поля на випромінювач зменшено його опір випромінювання, але ця поправка, зазвичай, лежить в межах похибки вимірювань.

Знаючи випромінювану потужність P_a і звуковий тиск p_1 , що створено гучномовцем в заглушеній камері на відстані 1 м від його робочого центру, можна знайти коефіцієнт осової концентрації

$$\Omega = \frac{4\pi p_1^2}{\rho c P_a} = 3,05 \cdot 10^{-2} \frac{p_1^2}{P_a},$$

де $p_1^2 = \frac{p_r}{r}$, p_r - звуковий тиск, що виміряний на відстані r (в метрах).

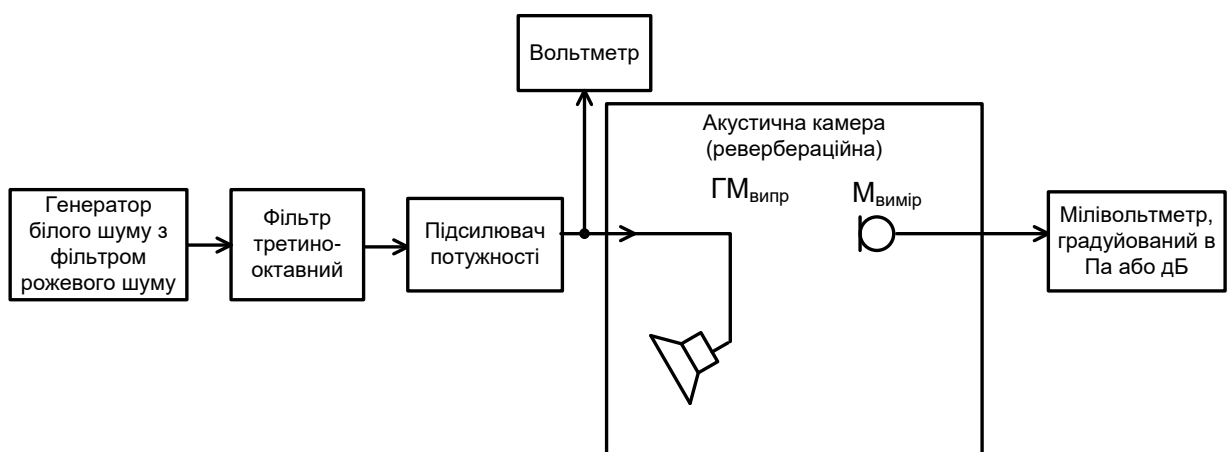


Рисунок 4.7 - Схема вимірювання акустичної потужності гучномовця: ;
ГМ_{випр} - випробуваний гучномовець; М_{вимір} – вимірювальний мікрофон

Вимірювання коефіцієнта нелінійних спотворень. (Під цим коефіцієнтом розуміють коефіцієнти гармонічних і інтермодуляційних спотворень n -го порядку і сумарні спотворення). Вимірювання ведуть при підведенні до гучномовцю номінальної напруги за схемою рис. 4.5, а до вимірювального мікрофону підключають вимірювач нелінійних спотворень або аналізатор гармонік.

В разі вимірювання коефіцієнта гармонічних спотворень до гучномовцю підводять синусоїдну напругу на заданих частотах і вимірюються вихідні напруги вимірювального мікрофона U_k на основній частоті і гармоніках (зазвичай, другій і третій). Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (у відсотках)

$$K_{\text{н.с.}} = K_{\text{г.с.}} = 100 \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2}{U_1^2}}.$$

При вимірюванні коефіцієнта інтермодуляційних спотворень до гучномовця подають напругу від двох тональних генераторів, частоти яких f_1 і f_2 встановлюють таким чином: частота f_1 обирають з переважного ряду на $1/3$ вище нижньої межі номінального діапазону, частоти f_2 повинні бути не нижче $6f_1$ (обумовлено в технічній документації). Напруги генераторів встановлюють в співвідношенні 4:1 для загальної напруги, що дорівнює номінальній. Аналізатором гармонік визначають напругу на виході вимірювального мікрофона на частотах f_2 , $f_2 \pm f_1$ та $f_2 \pm 2f_1$. Сумарний коефіцієнт інтермодуляційних спотворень

$$K_{\text{н.с.}} = K_{\text{и.с.}} = 100 \sqrt{\frac{(U_{f_2-f_1} + U_{f_2+f_1})^2 + (U_{f_2-2f_1} + U_{f_2+2f_1})^2}{U_{f_2}^2}}.$$

де $U_{f_2-f_1}$, $U_{f_2+f_1}$, $U_{f_2-2f_1}$, $U_{f_2+2f_1}$, U_{f_2} - напруги (звуковий тиск) на відповідних частотах.

Вимірювання вхідного опору гучномовців. Ці вимірювання проводять так само як і в разі вимірювання будь-якого комплексного опору. Вимірюють його на переважному ряду частот з інтервалом $1/3$ октави від $0,5f_m$ до $1,5f_m$ і через октаву в іншому діапазоні частот. При цьому обов'язково знаходять максимум і мінімум модуля вхідного опору. Першому відповідає частота механічного резонансу f_m , другому - частота електромеханічного резонансу $f_{\text{е.м.}}$.

Найбільш поширену схему вимірювання вхідного опору наведено на рис. 4.8. Вона заснована на порівнянні опорів гучномовця і магазину опорів. Останній підбирають так, щоб напруга на гучномовці U_r і на магазині U_R була однаковою. Опір магазину при цьому дорівнює модулю Z .

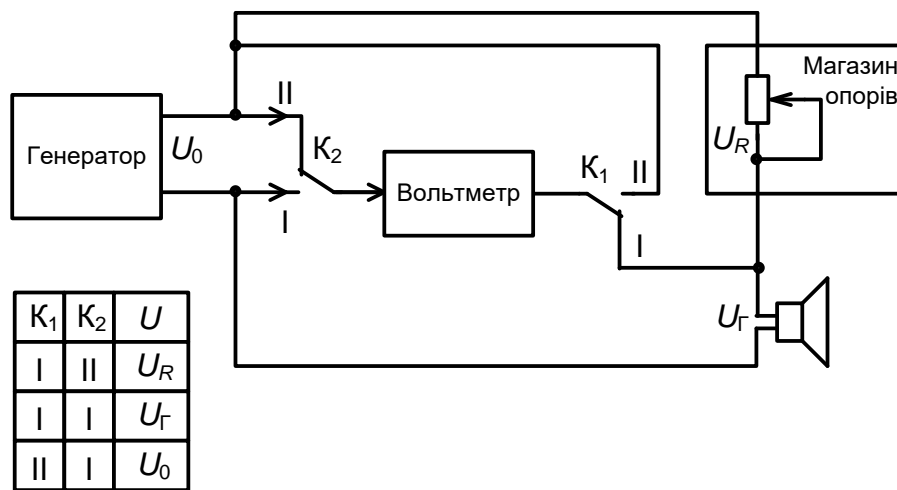


Рисунок 4.8 - Схема вимірювання вхідного опору гучномовця

К - ключі для перемикання вольтметра; U_0 - загальна напруга; U_{Γ} - напруга на гучномовці; U_R - напруга на опорі

Якщо треба знати фазовий кут вхідного опору, то вимірюють при цьому напругу на виході звукового генератора U_0 . Кут визначають з виразу

$$\cos \varphi = \frac{U_0^2}{2U_{\Gamma M}^2} - 1$$

Вимірювання швидкості коливань рухомої системи гучномовця. Воно зводено до вимірювання звукового тиску, що створено гучномовцем на відстані 1 м від його робочого центру. Швидкість коливань визначають за формулою

$$v = \frac{2\pi p_1}{\rho \omega S},$$

якщо гучномовець знаходиться в екрані.

В разі знаходження його в закритому корпусі множник 2 треба замінити на 4. Тут S - площа випромінювача; ρ - щільність середовища (повітря) і ω - кутова частота коливань.

Зняття характеристик телефону. Характеристики знімають в разі розташування телефону на штучному вусі. Вимірюють частотну характеристику чутливості випробуваного телефону $T_{\text{випр}}$ за схемою рис. 4.9. Чутливість визначають за формулою

$$E_{\Gamma} = \frac{p}{U_{\text{вх}}},$$

де $U_{\text{вх}}$ - напруга, що підведена до телефону, В; p - звуковий тиск, що створено телефоном у штучному вусі.

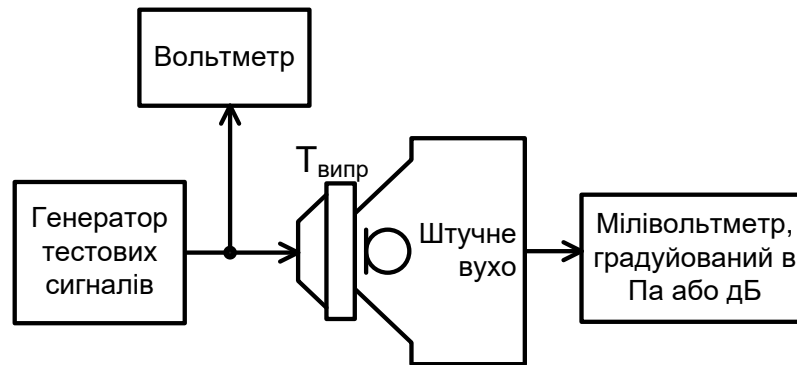


Рисунок 4.9 - Схема вимірювання чутливості телефону:
 $T_{\text{випр}}$ - випробуваний телефон

Для вимірювання віддачі послідовно з телефоном підключають активний опір, що чисельно дорівнює модулю опору телефону на частоті 1000 Гц при підведенні до схеми потужності 1 мВт. Вимірювання входного опору і коефіцієнта нелінійних спотворень проводять, як і для гучномовців.

Контрольні питання

1. Які вимірювальні сигнали та акустичні умови застосовуються для вимірювання параметрів електроакустичних перетворювачів
2. Поясніть методики вимірювання акустичних і електричних параметрів мікрофонів.
3. Поясніть методики вимірювання акустичних і електричних параметрів гучномовців.
4. Наведіть структурну схему вимірювання чутливостей мікрофона та гучномовця.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Базова

1. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов и др.; Под ред. Ковалгина Ю.А., - М.: Горячая линия - Телеком, Радио и связь, 2007. - 872 с.
2. Акустика: Учебник для вузов / Ш.Я. Вахитов, Ю.А. Ковалгин, А.А. Фадеев, Ю.П. Щевьев; Под ред. профессора Ю.А. Ковалгина. - М.: Горячая линия – Телеком, 2009. - 660 с.: ил.
3. Акустика: Справочник / А.П.Ефимов, А.В.Никонов, М.А.Сапожков, В.И.Шоров; Под ред. М.А.Сапожкова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1989. — 336 с.
4. Сапожков М.А. Электроакустика. Учебник для вузов. - М.: «Связь», 1978. - 272 с., ил.
5. Мишенков С.Л., Попов О.Б. Электроакустика и звуковое вещание: конспект лекций. Учебное пособие для вузов. - М. Горячая линия - Телеком, 2011. - 156 с., ил.
6. Вахитов Я. Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. - М.: Искусство, 1982. - 415 с., ил.
7. И. Алдошина, Р. Приттс. Музыкальная акустика. Учебник. - СПб.: Композитор Санкт-Петербург, 2006. - 720., ил.
8. А.Е. Колесников. Акустические измерения. - Л.: Судостроение, 1983. 256 с., ил.
9. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. М. Связь, 1973. 272 с. ил.

2. Допоміжна

10. Бытовая электроакустическая аппаратура: Справочник/ И.А. Алдошина, В.Б. Бревдо, Г.Н. Веселов и др. - М.: Радио и связь, 1992. - 320 с.: ил.
11. А. Нисбетт. Применение микрофонов. Москва. «Искусство», 1981. - 173 с.
12. Никонов А. В. Звукотехническое оборудование радиодомов и телецентров. М.: Радио и связь, 1986. — 152 с.: ил.

3. Інформаційні ресурси

1. Журнал «Звукорежиссер» - издание в области профессиональной звукорежиссуры, психоакустики, современных музыкально-компьютерных технологий и аудио-музыкальной индустрии. <http://www.625-net.ru/>
2. Журнал «Шоу-мастер» о профессиональной шоу-технике, звук и свет, технологии и решения, сатьи, форумы, ссылки, новости, архив.<http://www.show-master.ru/>
3. In/Out. Информационно-технический журнал о профессиональном оборудовании, используемом в различных областях шоу-бизнеса (звукозапись, радиовещание, видеопроизводство, свет и звук для концертных залов и дискотек) <http://www.inoutmag.ru/>
4. Журнал «625». Периодическое издание, посвященное всем техническим и технологическим аспектам телевизионного производства и вещания. <http://www.625-net.ru/>

5 Журнал «Техника и технологии кино». Журнал о технологиях и оборудовании киноиндустрии, а также всех составляющих кинопроизводства — операторское искусство, режиссура, свет, звук, графика, монтаж и т.д.
<http://www.625-net.ru/>

ПОКАЖЧИК

Найменування	Сторінка
акустична камера	130
акустична коливальна система	20
акустична потужність гучномовця	82
акустичне коротке замикання	88
акустичне оформлення гучномовців	98
акустичний трансформатор	21
асиметричний динамічний приймач градієнта тиску	51
визначення гучномовців	75
вимірювання характеристик гучномовців	134
вимірювання характеристик мікрофона	129
відкритий корпус	100
внесений електричний опір	12,13
внесений механічний опір	12,13
вугільний мікрофон	43
генератор тестових сигналів	130
головні стереотелефони (стереонавушники)	75,126
гостронаправлений мікрофон	41
гучномовець з фазоінвертором	111
динамічний діапазон	32
дифузор	85
дифузорний гучномовець	85
дифузорний динамічний гучномовець	88,90
діаграма спрямованості	80
діапазон відтворюваних частот	80
еквівалентна електрична схема динамічного мікрофона	48,50
еквівалентна схема перетворювача	14
експоненційний рупор	117
електретний мікрофон	56
електрична потужність гучномовця	77
електричний опір	11
електродинамічний мікрофон	45
електромагнітний мікрофон	43
електрорушійна сила	8
закритий корпус	103
звукова колонка	76
звуковий монітор	76

індекс спрямованості	29
коефіцієнт гармонічних спотворень	31
коефіцієнт електромеханічного зв'язку	8,9,10
коефіцієнт корисної дії	82
коефіцієнт осьової концентрації	81
коефіцієнт спрямованості	29
комбінований мікрофон	38,61
конденсаторний гучномовець	122
конденсаторний мікрофон	55
конструкція електродинамічного телефона	126
корекція частотної характеристики динамічного мікрофона	48,53,57
корпус з фазоінвертором	111
катушковий мікрофон	45
ларингофон	65
метод електромеханічних аналогій	15
механічний опір	11
мікрофон	26
мікрофонна система для Surround Sound	72
опір мікрофона	28
параболічний мікрофон	41
параметри гучномовців	75
параметри мікрофонів	27,33
перетворювач електродинамічного типу	8
перетворювач електромагнітного типу	10
перетворювач електростатичного типу	9
перетворювач п'єзоелектричного типу	10
перетворювач-генератор	6,
перетворювач-двигун	6
п'єзоелектричний мікрофон	44
плоский екран	98
побудова схем електричних аналогів механічних систем	19,22,47
позначення електричних елементів	16
позначення механічних елементів	16
потужність гучномовця	77
приймач градієнта тиску	26,36
приймач тиску	26,35,56
принцип взаємності або оберненості	6,8
причини нелінійних спотворень гучномовця	92
радіомікрофон	63

резонатор Гельмгольца	20
рівень власних завад	31
рівень характеристичної чутливості	79
рівень чутливості	28
рівняння лінійного перетворювача	7,13
роботи дифузора широкосмугової головки	91
роздільна мікрофонна стереосистема	66
рупор	116
рупорний гучномовець	116
середній стандартний звуковий тиск	79
співколивальна маса	87
стереомікрофон	66
стрічковий мікрофон	51
суміщена мікрофонна стереосистема	69
телефон	75,126
телефон	126
технічні показники мікрофонів	27,33
транзисторний мікрофон	44
фазоінвертор	112
характеристика випромінювача	86
характеристика спрямованості	29
характеристична потужність	79
характеристична чутливість	79
частотна залежність модуля вхідного опору гучномовця	107
частотна характеристика, амплітудно-частотна	30,47,56,80
характеристика	
чотиріполюсник	7
чутливість	27,
чутливість окремих ланок	32,84
PZM-мікрофон	42